



**STUDI EMISI SPONTAN FOTODIODA GALIUM ARSENIDA  
*P-I-N JUNCTION* PADA DAERAH CAHAYA TAMPAK**

**SKRIPSI**

Oleh

**Faiza Nur Laila  
NIM 161810201050**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2020**



**STUDI EMISI SPONTAN FOTODIODA GALIUM ARSENIDA  
*P-I-N JUNCTION* PADA DAERAH CAHAYA TAMPAK**

**SKRIPSI**

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk  
Menyelesaikan Program Studi Ilmu Fisika (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

**Faiza Nur Laila  
NIM 161810201050**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2020**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan di iringi rasa syukur dan terimakasih yang sebesar-besarnya untuk:

1. Kedua orang tuaku, Ibunda Liyumnah tersayang dan Ayahanda Sujoko tercinta yang selalu mendukung, menginspirasi, dan menyemangatiku dalam menjalani hidup.
2. Para pahlawan tanpa tanda jasa sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah mendidikku dengan penuh keikhlasan dan kesabaran.
3. Kakakku Ainur Riza, Kakak Iparku Badrus Sholeh, Keponakanku Assyfa Nur Sholihah dan Anisa Ramadhani, serta seluruh keluarga besar yang saya cintai.
4. Suamiku tercinta Ata Afik Abdillah, S.Kom yang setia memberi dorongan semangat di setiap keluhku.
5. Teman-temanku sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi (Phylosophi Enstein'16) yang mewarnai hidupku.
6. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

**MOTTO**

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi pula kamu menyukai sesuatu padahal ia amat buruk bagimu, Allah maha mengetahui sedang kamu tidak mengetahui”.

Terjemahan Surat Al-Baqarah ayat 216



---

\*) Kementrian Agama RI. 2014. *Al-Quran terjemah dan Tajwid*. Bandung:PT. Sygma Examedia Arkanleema

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Faiza Nur Laila

NIM : 161810201050

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Studi Emisi Spontan Fotodiode Galium Arsenida *p-i-n* Junction pada Daerah Cahaya Tampak” adalah benar-benar hasil karya ilmiah antara dosen pembimbing dan saya selaku mahasiswa, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas kesalahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang di junjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 14 September 2020

Yang menyatakan,

Faiza Nur Laila

NIM 161810201050

**SKRIPSI**

**STUDI EMISI SPONTAN FOTODIODA GALIUM ARSENIDA  
*P-I-N JUNCTION* PADA DAERAH CAHAYA TAMPAK**

Oleh

Faiza Nur Laila

NIM 161810201050

Pembimbing

Dosen pembimbing Utama : Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.

Dosen Pembimbing Anggota : Ir. Misto, M.Si

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Studi Emisi Spontan Fotodiode Galium Arsenida *p-i-n Junction* pada Daerah Cahaya Tampak” telah diuji dan disahkan pada

Hari, tanggal :

Tempat : Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Jember

Tim Penguji,

Ketua

Anggota I

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si

Ir. Misto, M.Si

NIP 198111112005012001

NIP. 195911211991031002

Anggota II

Anggota III

Agung T. Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D

Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D

NIP 196812191994021001

NIP. 197202101998021001

Menyatakan

Dekan Fakultas MIPA,

Drs. Achmad Sjaifullah, M.Sc., Ph.D.

NIP.195910091986021001

## RINGKASAN

**Studi Emisi Spontan Fotodioda Galium Arsenida *p-i-n junction* pada Daerah Cahaya Tampak;** Faiza Nur Laila, 161810201050; 2020: 62 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Fotodioda merupakan devais optoelektronik yang dapat mengkonversi energi cahaya (opto) menjadi energi listrik (elektronik). Fotodioda merupakan jenis dioda yang sangat sensitif terhadap cahaya, dimana resistansinya bergantung pada intensitas cahaya yang diterima. Semakin banyak intensitas cahaya yang di terima maka resistansi fotodioda semakin kecil, begitupun sebaliknya semakin sedikit intensitas cahaya yang masuk maka resistansinya akan semakin besar.

Pada umumnya fotodioda terbuat dari bahan semikonduktor. Bahan yang sering digunakan yaitu bahan semikonduktor murni Silikon (Si) dan Germanium (Ge), kedua bahan tersebut tersedia melimpah di alam setelah Oksigen (O<sub>2</sub>). Bahan semikonduktor paduan lain juga digunakan seperti Galium Arsenida (GaAs). Sebagai bahan yang digunakan dalam pembuatan fotodioda, terdapat fenomena optik dan elektrik pada bahan semikonduktor yang dapat mempengaruhi daya hantar listrik akibat penyerapan gelombang elektromagnetik. Hamburan foton yang dihasilkan dari proses penyerapan cahaya dapat mempengaruhi transport elektron dan *hole* yaitu absorpsi dan emisi.

Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi peristiwa emisi spontan devais fotodioda GaAs untuk menggambarkan nilai daya maksimum foton terhambur yang dihasilkan akibat variasi panjang gelombang foton datang dari 445 nm hingga 875 nm. Devais dimodelkan ke dalam geometri 2 dimensi (5  $\mu\text{m}$  x 1  $\mu\text{m}$ ). Selanjutnya yaitu pembuatan *mesh* pada geometri devais dengan distribusi banyaknya elemen yaitu 500. Solusi persamaan differensial parsial dari devais semikonduktor dihitung pada setiap elemen yaitu persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas pembawa muatan. Selanjutnya, parameter input yang di variasikan yaitu nilai panjang gelombang foton datang pada devais.



Hasil penelitian menggambarkan profil kurva emisi spontan dalam geometri 2D pada devais fotodioda GaAs, dimana kurva daya emisi spontan yang dihasilkan oleh GaAs untuk variasi panjang gelombang foton datang memiliki bentuk kurva yang sama hanya saja nilai maksimum daya emisi fotonnya berbeda. Pada seluruh foton datang dengan panjang gelombang dari (445-875) nm, tidak terjadi emisi foton dengan energi di bawah energi *bandgap* GaAs. Daya maksimum emisi spontan paling besar berada pada panjang gelombang 725 nm dengan energi foton terhambur 1,438 eV. Perhitungan nilai FWHM dilakukan untuk mendeteksi daerah energi foton terhambur yang dapat menghasilkan besarnya perubahan terkecil dari daya emisi spontan. Hasil perhitungan menunjukkan adanya 6 pengelompokan nilai FWHM, dimana setiap pengelompokan data memiliki bentuk yang sama yakni menurun secara linier ketika panjang gelombang foton datang semakin besar.

## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat nikmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Emisi Spontan Fotodioda Galium Arsenida *p-i-n Junction* pada Daerah Cahaya Tampak”. Skripsi ini di susun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Ir. Misto, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran serta perhatian demi selesainya penelitian dan penulisan skripsi ini;
2. Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D selaku Dosen Penguji I dan Bowo Eko Cahyono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan, kritikan dan saran demi kesempurnaan skripsi ini.;
3. Drs. Yuda Cahyoargo Hariadi, M.Sc., Ph.D selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
4. Sahabatku Irna Dwi Utami dan Ayu Kristina yang banyak membantu dalam segala hal selama penulis menimba ilmu di Universitas Jember;
5. Teman seangkatan Phylosopi Einstein'16 yang senantiasa menghiasi hari-hari penulis selama perkuliahan.
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 14 September 2020  
Penulis

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERSEMBAHAN .....	ii
DAFTAR MOTTO .....	iii
DAFTAR PERNYATAAN .....	iv
DAFTAR PEMBIMBINGAN .....	v
DAFTAR PENGESAHAN .....	vi
RINGKASAN .....	vii
PRAKATA .....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Tujuan Penelitian .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Manfaat Penelitian .....</b>	<b>4</b>
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Fotodiode .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Karakteristik dan Prinsip Kerja Fotodiode.....</b>	<b>6</b>
2.2.1 Karakteristik Fotodiode .....	6
2.2.2 Cara Kerja Fotodiode.....	6
<b>2.3 Fotodiode <i>p-i-n Junction</i> .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Material GaAs.....</b>	<b>10</b>
<b>2.5 Persamaan Dasar Fotodiode GaAs.....</b>	<b>11</b>
2.5.1 Persamaan Poisson.....	11
2.5.2 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan.....	12
<b>2.6 Absorpsi, Emisi Spontan dan Emisi Terstimulasi.....</b>	<b>13</b>
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN.....</b>	<b>17</b>

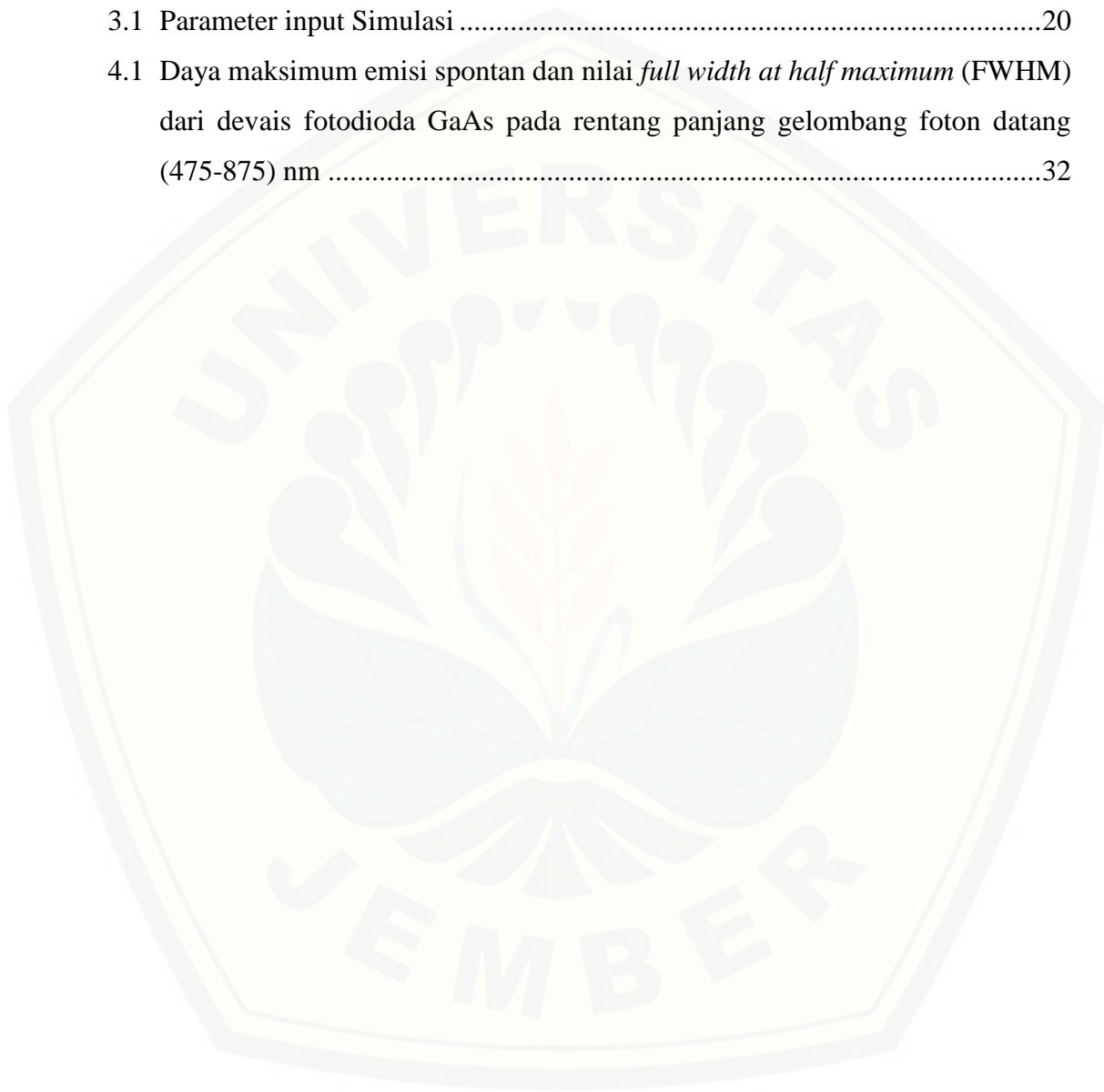
<b>3.1 Rancangan Penelitian</b> .....	17
<b>3.2 Jenis dan Sumber Data</b> .....	18
3.2.1 Jenis Penelitian .....	18
3.2.2 Sumber Data Penelitian .....	18
<b>3.3 Variabel Penelitian</b> .....	18
<b>3.4 Kerangka Pemecahan Masalah</b> .....	19
3.4.1 Identifikasi Permasalahan dan Studi Pustaka .....	19
3.4.2 Proses Simulasi.....	19
<b>3.5 Analisis Data</b> .....	24
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	27
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	36
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	36
<b>5.2 Saran</b> .....	36
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	37
<b>LAMPIRAN</b> .....	40

DAFTAR GAMBAR

	halaman
2.1 Simbol dan bentuk fisik Fotodioda .....	5
2.2 Struktur dasar <i>p-i-n</i> fotodioda .....	8
2.3 Fotodioda <i>p-i-n</i> dengan tegangan terbalik.....	9
2.4 Diagram Pita Energi Dioda <i>p-i-n</i> .....	10
2.5 Kristal GaAs dan Struktur kristalnya .....	11
2.6 Struktur Pita GaAs .....	14
2.7 Mekanisme Absorpsi, Emisi Spontan, dan Emisi Terstimulasi .....	14
3.1 Diagram alir kegiatan penelitian .....	17
3.2 Geometri Fotodioda GaAs .....	21
3.3 Alur Simulasi Studi Emisi Spontan Fotodioda GaAs <i>p-i-n</i> .....	27
4.1 Kurva daya emisi spontan devais fotodioda GaAs saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang $\lambda=475$ nm .....	28
4.2 Kurva daya emisi spontan devais fotodioda GaAs saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang $\lambda=575$ nm .....	29
4.3 Kurva daya emisi spontan devais fotodioda GaAs saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang $\lambda=725$ nm .....	30
4.4 Kurva daya emisi spontan devais fotodioda GaAs saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang $\lambda=855$ nm .....	30
4.5 Distribusi panjang gelombang foton terhambur dan daya emisi spontan yang dihasilkan oleh devais saat dikenai foton datang pada interval panjang gelombang (475-875) nm.....	33
4.6 Hubungan nilai FWHM dan panjang gelombang foton datang pada interval (475-875) nm .....	35

**DAFTAR TABEL**

	halaman
3.1 Parameter input Simulasi .....	20
4.1 Daya maksimum emisi spontan dan nilai <i>full width at half maximum</i> (FWHM) dari devais fotodiode GaAs pada rentang panjang gelombang foton datang (475-875) nm .....	32



**DAFTAR LAMPIRAN**

halaman

Lampiran 1. Data daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 475 nm.....	40
Lampiran 2. Data daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 475 nm.....	46
Lampiran 3. Data daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 475 nm.....	51
Lampiran 4. Data daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 475 nm.....	56
Lampiran 5. Kurva FWHM daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 475 nm.....	62

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemodelan terhadap sebuah devais/perangkat optoelektronika sangat diperlukan dalam rangka untuk mempelajari secara teoritik prinsip kerja dari sebuah perangkat/alat. Dalam beberapa aplikasinya, kegiatan pemodelan di bidang optoelektronika melibatkan mekanisme konversi energi cahaya (opto) menjadi energi listrik (elektrik). Salah satu devais yang bekerja berdasarkan karakteristik di atas adalah fotodioda. Fotodioda merupakan bentuk aplikasi dari dioda yang memiliki prinsip kerja yang sama dengan sel surya, yakni mendeteksi dan mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik. Perbedaannya yaitu sel surya digunakan dengan prinsip efek photovoltaik dan memiliki permukaan yang sangat luas yang menjadikan perangkat sel surya ini lebih sensitif terhadap cahaya yang masuk dan menghasilkan tegangan dan arus yang lebih kuat dari fotodioda. Oleh karena itu, pada sel surya digunakan sumber cahaya matahari langsung karena matahari merupakan sumber cahaya terkuat yang dapat di manfaatkan. Sedangkan, untuk fotodioda memiliki permukaan yang lebih kecil sehingga menggunakan energi cahaya dengan panjang gelombang tertentu untuk menghasilkan energi listrik dengan prinsip kerja sebagai sensor.

Fotodioda merupakan jenis dioda semikonduktor yang berfungsi mendeteksi cahaya dengan cara mengubah sinyal cahaya menjadi arus listrik dengan kemampuan resistansi yang berubah-ubah sesuai dengan perubahan intensitasnya. Semakin besar intensitas cahaya yang mengenai fotodioda maka semakin kecil resistansinya, begitu pula sebaliknya (Sutrisno, 1986). Fotodioda memiliki kepekaan yang tinggi pada panjang gelombang tertentu, tidak peka terhadap variasi suhu, noise yang rendah dan responnya cepat (Siregar, 2016).

Semikonduktor sebagai bahan yang memiliki konduktivitas di antara bahan konduktor dan bahan isolator, banyak digunakan dalam pembuatan devais aktif elektronika seperti dioda, transistor dan *IC (intregated circuit)* hingga fotodioda. Bahan semikonduktor yang sering digunakan dalam pembuatan fotodioda yaitu



Silikon (Si) dan Germanium (Ge) karena ketersediaannya yang melimpah di bumi setelah Oksigen (O<sub>2</sub>). Material lain yang sifatnya sama juga digunakan, seperti kristal Galium Arsenida (GaAs), Indium Arsenida (InAs), dan lain-lain. Semikonduktor GaAs banyak digunakan saat ini karena keunggulannya tahan terhadap radiasi, dan tahan terhadap panas, serta kecepatan mobilitas elektron yang cukup tinggi. Oleh karena itu elektron dapat bergerak dengan cepat dalam bahan GaAs, sehingga *chip* yang dibuat dari bahan ini berpotensi untuk bekerja lebih cepat (Liouliou et al., 2017).

Kristal semikonduktor GaAs merupakan material paduan dari unsur golongan IIIA dan VA yaitu Galium (Ga) dan Arsenida (As), sehingga sering di sebut dengan *binary compound semiconductor*. GaAs dapat beroperasi hingga ke daerah yang berfrekuensi tinggi karena memiliki celah pita energi yang lebih besar di bandingkan silikon, yaitu 1,42 eV untuk GaAs dan 1,12 eV untuk silikon dengan struktur pita energi untuk GaAs yaitu *direct bandgap* (struktur pita energi transisi langsung) dan silikon yaitu *indirect bandgap* (struktur pita energi transisi tidak langsung) (Flickinger et al., 2017).

Sebagai bahan yang digunakan dalam pembuatan fotodioda, terdapat fenomena optik dan elektrik pada bahan semikonduktor yang dapat mempengaruhi daya hantar listrik akibat penyerapan gelombang elektromagnetik. Ketika bahan semikonduktor terkena paparan cahaya, energi foton memicu pergerakan elektron-*hole* pada diagram level energi. Saat energi foton lebih besar dari energi gap (semikonduktor) ada dua jenis hamburan foton yang dapat mempengaruhi transport elektron dan *hole* yaitu absorpsi foton dan emisi foton (Akinlami dan Ashamu, 2013).

Penelitian mengenai performa dari devais fotodioda Galium Arsenida (GaAs) pernah dilakukan oleh Flickinger et al. (2007). Pada penelitiannya, Flickinger et al. (2007) menganalisis responsivitas fotodioda GaAs pada panjang gelombang 600 nm hingga 900 nm dan frekuensi respon fotodioda pada panjang gelombang 633 nm dan 850 nm. Analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat simulasi Rsoft LaserMOD. Hasil yang di peroleh menunjukkan responsivitas rendah terjadi pada

panjang gelombang 633 nm dan frekuensi respon terbaik pada panjang gelombang 850 nm.

Hamady et al. (2012) juga melakukan study simulasi pada fotodioda *p-i-n Junction* menggunakan software COMSOL Multiphysics versi 3.5a. Bahan yang di modelkan adalah Silikon menggunakan metode CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*). Study dilakukan untuk mengetahui pengaruh jarak pita pada dua elektroda (*d*), pengaruh kedalaman sambungan (*ju*) dan pengaruh perbedaan ketebalan subtract (*y*) terhadap konsentrasi *doping*, potensial listrik, dan karakteristik arus-tegangan (*I-V*). Distribusi potensial listrik pada bias maju disekitar tipe-p dan pada bias mundur disekitar tipe-n, sedangkan pada tegangan ambang Silikon mendekati 0,7V dan distribusi potensial listrik hampir tidak tampak. Pada tegangan bias mundur tegangan ditunjukkan sebuah daya tarik arus yang terbagi menjadi 3 daerah, yakni: 0V sampai -15V daerah *Trap-Assisted Tunneling*, -15V sampai -22 V daerah *band-to-Band Tunneling*, dan -22 kebawah adalah daerah *Avalanche*. Tegangan *breakdown* terjadi sekitar 22V.

Selain sifat diatas faktor lain yang mempengaruhi kinerja fotodioda adalah kemampuan mengemisikan foton. Emisi foton muncul saat elektron yang dalam keadaan tereksitasi berpindah ke keadaan dasarnya melalui proses rekombinasi elektron-*hole*. Emisi foton sendiri ada dua macam yaitu emisi spontan dimana tidak membutuhkan foton pemicu dan emisi terstimulasi yang mensyaratkan sejumlah foton pada prosesnya. Perlu mengkaji mengenai emisi spontan karna energi non koheren yang dihasilkan pada proses ini penting untuk karakteristik kebisingan (*noise*) pada suatu semikonduktor (Ghafouri-Shiraz, 2003).

Pilkhun dan Rupprecht (1966), secara eksperimen telah mengamati emisi spontan dan emisi terstimulasi dioda GaAs pada struktur tiga lapisan dengan variasi konsentrasi doping pada lapisan tipe-p dan tipe-n, lebar lapisan tengah juga divariasi dari 2-20  $\mu\text{m}$ . Hasil pengamatan menunjukkan ketika diberikan konsentrasi donor lebih dari  $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , terjadi emisi pada energi foton 1,48 eV karena elektron berekombinasi di sisi sambungan p. Jika konsentrasi donor lebih kecil dari  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  emisi yang terjadi pada energi foton sekitar 1,5 eV karena *hole* berekombinasi di sisi sambungan n.

Dari uraian diatas maka penelitian ini dilakukan sebagai pengembangan dua penelitian yang telah dilakukan oleh Hamady et al. (2012) dan Pilkhun dan Rupprecht (1966). Proses simulasi dilakukan untuk mengetahui emisi spontan fotodioda GaAs pada daerah cahaya tampak. Metode dan perangkat simulasi yang digunakan sama dengan penelitian Hamady et al. (2012) namun dilakukan pada bahan yang berbeda. Struktur dan bahan penelitian emisi spontan sama dengan penelitian Pilkhun dan Rupprecht (1966) yang dilakukan dengan variasi konsentrasi doping dan ketebalan lapisan. Sedangkan, pada penelitian ini dilakukan sapuan panjang gelombang dimana daya cahaya yang datang dibuat konstan sementara panjang gelombang foton yang datang divariasi dari 445 nm hingga 875 nm. Energi celah pita pada material GaAs sebesar 1,42 eV. Emisi spontan dihitung dari masa hidup pasangan elektron-hole.

### **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang diatas dapat dirumuskan permasalahan yaitu bagaimana pengaruh variasi panjang gelombang foton datang terhadap daya emisi spontan yang dihasilkan oleh fotodioda GaAs di daerah spektrum cahaya tampak?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan sebelumnya, tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi panjang gelombang foton yang datang terhadap besar daya emisi spontan yang di hasilkan oleh fotodioda di daerah spektrum cahaya tampak.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

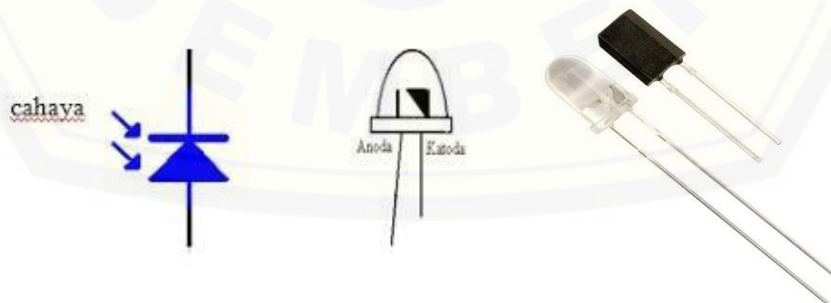
Beberapa manfaat yang di harapkan dapat dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan pada penelitian lebih lanjut di bidang pemodelan komputasi.
2. Hasil penelitian dapat memberikan tambahan informasi fisis yang berkaitan dengan kinerja fotodioda GaAs.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Fotodiode

Dioda merupakan suatu komponen elektronika aktif yang terbuat dari bahan semikonduktor. Dioda memiliki 2 buah kaki yang berbeda yaitu kaki katoda yang bermuatan negatif dan kaki anoda yang bermuatan positif. Arus listrik pada dioda hanya dapat mengalir dari anoda ke katoda, begitupun sebaliknya arus listrik akan tertahan (tidak dapat lewat) jika arus listrik masuk melalui katoda. Salah satu jenis dioda berdasarkan fungsinya yaitu dioda photo (fotodiode). Fotodiode adalah devais optoelektronik yang dapat mengkonversi energi cahaya (opto) menjadi energi listrik (elektronik). Fotodiode merupakan jenis dioda yang sangat sensitif terhadap cahaya, dimana resistansinya bergantung pada intensitas cahaya yang diterima. Resistansi fotodiode berubah-ubah seiring perubahan intensitas cahaya yang mengenainya. Semakin banyak intensitas cahaya yang di terima maka resistansi fotodiode semakin kecil, begitupun sebaliknya semakin sedikit intensitas cahaya yang masuk maka resistansinya akan semakin besar (Bilshop, 2004). Hal ini dikarenakan sifat fotodiode yang dapat merespon stimulus berupa cahaya tampak maupun tidak tampak dan mengkonversikannya menjadi arus. Fotodiode sering digunakan pada kondisi *reverse bias* dimana resistansinya akan turun seiring pertambahan intensitas cahaya yang masuk. Fotodiode memiliki resistansi rendah pada kondisi *forward bias* (Nasution et al., 2015).



Gambar 2.1 Simbol dan bentuk fisik Fotodiode (Setyaningsih et al., 2017)

Pada umumnya fotodiode terbuat dari bahan semikonduktor. Bahan yang sering digunakan yaitu bahan semikonduktor murni Silikon (Si) dan Germanium

(Ge), kedua bahan tersebut tersedia melimpah di alam setelah Oksigen (O<sub>2</sub>). Bahan semikonduktor paduan seperti Galium Arsenida (GaAs), Indium Antimonide (InSb), Indium Arsenida (InAs) dan Lead Selenide (PbSe) juga digunakan untuk pembuatan fotodiode (Setyaningsih et al., 2017). Bahan-bahan ini dapat menyerap cahaya dengan karakteristik panjang gelombang 2500 Å -11000 Å untuk silikon, 8000 Å - 20000 Å untuk GaAs (Dieter, 1990).

## 2.2 Karakteristik dan Prinsip Kerja Fotodiode

### 2.2.1 Karakteristik Fotodiode

Pada umumnya, devais fotodiode dilengkapi dengan *optical filter* berupa lensa untuk melewatkan cahaya inframerah. Namun tidak semua cahaya inframerah dapat di filter dengan baik. Faktor yang mempengaruhi kemampuan penerima inframerah adalah *Active area* dan *Respond time*.

Ketika area penerimaan suatu diode semakin diperbesar akan semakin banyak intensitas cahaya yang di kumpulkan sehingga arus bocor yang di harapkan pada teknik *reversed bias* semakin besar. Area penerimaan dapat diperbesar dengan cara memperbesar sudut penerimaannya. Namun kelemahan dari area penerimaan yang di perbesar akan menyebabkan *noise* yang dihasilkan juga semakin besar. Begitu pula respon terhadap frekuensi, dimana jika area penerimaan di perbesar maka frekuensinya turun dan sebaliknya memperkecil area penerimaan akan menghasilkan respon terhadap sinyal frekuensi tinggi cukup baik. Area penerimaan yang dimaksud misalnya diode inframerah (Ahmad et al., 2018).

*Respond time* dari suatu diode (penerima) yang dimaksud adalah lama diode penerima merespon cahaya yang datang ke daerah penerima dalam satuan detik. *Respond time* yang di harapkan sebesar kurang lebih 500 nano detik atau kurang. Jika terlalu besar maka diode tidak dapat merespon sinyal cahaya akibatnya muncul data *loss* (Ahmad et al., 2018).

### 2.2.2 Cara Kerja Fotodiode

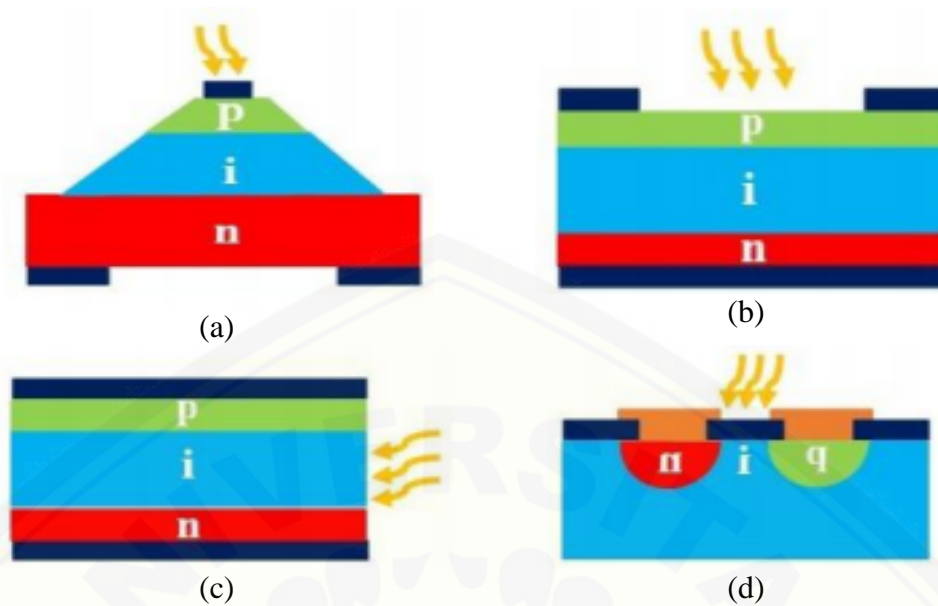
Pada dasarnya fotodiode merupakan sambungan diode pendeteksi cahaya yang terbuat dari bahan semikonduktor tipe-P dan tipe-N yang disambungkan. Fotodiode memiliki dua kaki yaitu kaki anoda dan kaki katoda. Semikonduktor

tipe-P berfungsi sebagai anoda dan semikonduktor tipe-N berfungsi sebagai katoda. Kedua jenis semikonduktor tersebut dapat tersambung karena elektron bebas pada semikonduktor tipe-N mengisi *hole* di semikonduktor tipe -P. Area pertemuan ini disebut wilayah deplesi (*depletion region*), dimana daerah ini dapat membangkitkan pembawa muatan minoritas saat terdapat cukup energi termal untuk membangkitkan pasangan elektron dan *hole*. Daerah deplesi ini yang kemudian menghambat transfer elektron kecuali jika diberi secara *forward biased* (bias maju) di persimpangan. Sebaliknya jika diberi *reversed biased* (bias mundur) tidak dapat memicu pergerakan elektron sehingga komponen semikonduktor hanya dapat dialiri arus satu arah saja. Sehingga dibutuhkan energi yang cukup besar bagi pembawa muatan saat diberi keadaan bias balik (Sinaga, 2006).

Ketika sebuah foton dari sumber cahaya diserap, hal ini dapat membangkitkan suatu elektron dan menghasilkan pasangan muatan pembawa (elektron dan *hole*) pada kedua sisi sambungan yang besarnya tergantung besarnya intensitas cahaya yang mengenai fotodioda. Elektron yang dihasilkan tersebut ketika masuk ke dalam pita konduksi akan mengalir ke arah positif sumber tegangan, sedangkan *hole* akan mengalir ke arah negatif sumber tegangan sehingga arus dapat mengalir pada rangkaian. Arah arus yang mengalir berlawanan dengan arah gerak muatan pembawa. Besarnya arus berbanding lurus dengan besar intensitas cahaya yang mengenainya. Arus yang dimaksud merupakan arus bocor ketika fotodioda di sinari dalam keadaan *reversed bias* (bias mundur) (Setyaningsih et al., 2017).

### 2.3 Fotodioda *p-i-n Junction*

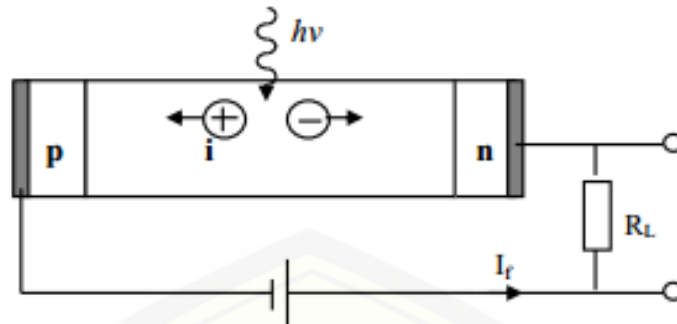
Menurut Ahmad et al. (2018), fotodioda *p-i-n* didasarkan pada sambungan p-n dengan menambahkan bagian-I diantara semikonduktor jenis-p dan jenis-n sehingga memiliki wilayah deplesi yang besar. Penambahan wilayah deplesi bertujuan agar foton dapat menghasilkan pasangan elektron-*hole* yang lebih banyak sehingga dapat meningkatkan efisiensi fotodioda itu sendiri. Fotodioda sambungan p, i, dan n dapat disusun dengan cara yang berbeda, seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur dasar  $p-i-n$  fotodiode (a) Struktur vertikal dengan penerangan di permukaan, (b) struktur planar vertikal dengan penerangan di permukaan, (c) Struktur planar vertikal dengan penerangan ditepi, (d) Struktur planar dengan penerangan dipermukaan (Ahmad et al., 2018)

Struktur fotodiode  $p-i-n$  dibuat dengan menambahkan lebar lapisan deplesi untuk menambah area penangkapan cahaya. Pada struktur ini kapasitansi persambungan berbanding terbalik dengan daerah deplesi, oleh karena itu daerah deplesi menyerap lebih banyak foton. Untuk mendapatkan frekuensi respon yang tinggi pada fotodiode  $p-i-n$ , mobilitas elektron harus lebih besar dari *hole* (Saleh dan Teich, 2007).

Dalam penggunaannya, digunakan tegangan terbalik yang cukup tinggi yang mengakibatkan bagian- $i$  sebagai daerah deplesi dari elektron-*hole* memiliki konsentrasi yang sangat rendah dibandingkan konsentrasi impuritas. Ketika foton yang merupakan bagian terkecil dari partikel cahaya sebesar energi gap mengenai bagian- $i$  maka foton tersebut akan menciptakan pasangan elektron-*hole*, dimana elektron akan berpindah dari pita valensi ke pita konduksi yang selanjutnya akan bertindak sebagai *carrier* (*Photocarrier*). *Carrier* tersebut selanjutnya akan berubah menjadi arus listrik (*Photocurrent*) (Siregar, 2016). Rangkaian fotodiode  $p-i-n$ , ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Fotodioda *p-i-n* dengan tegangan terbalik (Agrawal, 2002)

Fotodioda memiliki 2 kaki yaitu kaki anoda dan kaki katoda yang bekerja pada *reverse bias* dengan *reverse voltage* maksimal 32 volt (Zemansky dan Sears, 2003). Disamping itu, sebuah fotodioda harus memiliki kepekaan yang tinggi pada panjang gelombang tertentu dengan noise yang rendah, respon yang cepat dan tidak peka terhadap suhu (Agrawal, 2002). Untuk mengetahui besarnya resistansi dari sebuah fotodioda dapat dihitung menggunakan persamaan

$$V_{out} = \frac{R1}{R1 + R} \times V_{in} \quad (2.1)$$

Keterangan:

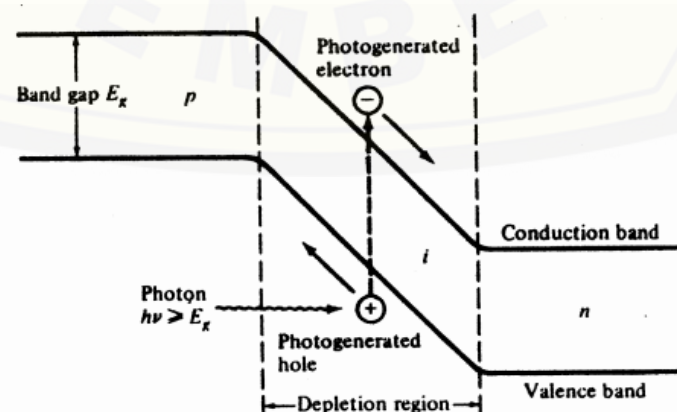
$V_{out}$  = Tegangan *output* pada rangkaian sensor Fotodioda

$V_{in}$  = Tegangan masukan pada rangkaian sensor fotodioda

$R1$  = Resistansi fotodioda

$R2$  = Resistansi resistor pada rangkaian sensor fotodioda.

Diagram pita energi pada dioda sambungan *p-i-n* digambarkan sebagai berikut:



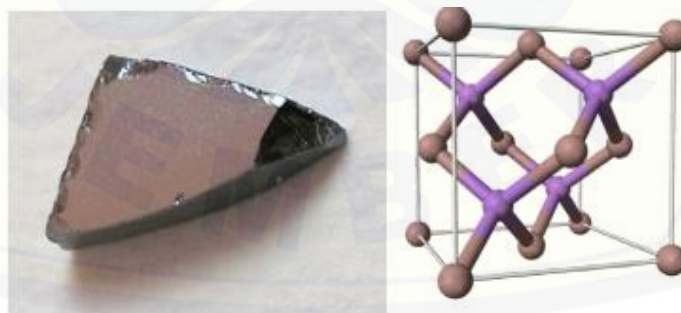


Gambar 2.4 Diagram pita energi dioda *p-i-n*

Gambar 2.4 menunjukkan diagram tingkat energi pita pada sambungan *p-i-n* dimana ketika energi foton yang datang memiliki energi yang lebih besar dari energi *bandgap* (celah pita) maka foton akan memberikan energinya dan membangkitkan elektron (di daerah deplesi) dari pita valensi ke pita konduksi (Dieter, 1990).

## 2.4 Material GaAs

Galium Arsenida (GaAs) beserta paduan *Ternary* nya merupakan material yang sering digunakan pada aplikasi devais elektronik maupun optoelektronik. Kristal GaAs diperoleh dari unsur golongan III (Ga) dan V (As) yang tersusun secara tetrahedral, di mana satu atom Ga di kelilingi empat atom As, begitupun satu atom As di kelilingi empat atom Ga terdekat (Sze, 1985). Susunan secara tetrahedral tersebut akan membentuk delapan  $sp^3$  hybridized orbital dimana terpisah menjadi keadaan empat orbital *bonding* (membentuk pita valensi) dan empat orbital *antibonding* (membentuk pita konduksi). Ikatan kimia pada Galium Arsenida (GaAs) terbentuk dari peminjaman elektron oleh unsur dengan valensi lebih tinggi ke unsur dengan valensi lebih rendah. Pada semikonduktor paduan, atom donor adalah unsur dengan valensi lebih tinggi sedangkan atom akseptor adalah unsur dengan valensi lebih rendah (Takahashi dan Konagai, 1986).



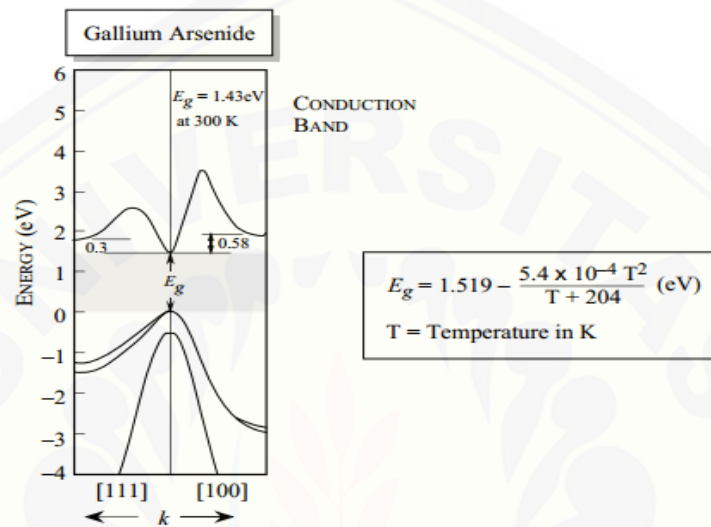
Gambar 2.5 Kristal GaAs dan struktur kristalnya (Sze, 1985)

Material GaAs memiliki struktur pita energi transisi langsung (*direct bandgap*), dengan energi *gap* saat temperatur 0K sebesar 1,52 eV dan saat temperatur 300K adalah 1,43 eV (Singh, 2007). *Bandgap* langsung pada GaAs di

karenakan tidak adanya momentum tambahan, sehingga antara minimum pita konduksi dan maksimum pita valensi segaris lurus.

Pita energi dengan suhu dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$E_g(T) = 1,519 - \frac{(5,4 \times 10^{-4})T^2}{(T + 204)} \text{ (eV)} \quad (2.2)$$



Gambar 2.6 Struktur pita energi GaAs (Singh, 2007)

## 2.5 Persamaan Dasar Fotodiode GaAs

### 2.5.1 Persamaan Poisson

Persamaan Poisson merupakan persamaan yang menjelaskan perubahan medan listrik ( $\vec{E}$ ) karena adanya perbedaan konsentrasi pembawa muatan ( $\rho$ ). Perubahan medan listrik berbanding lurus dengan konsentrasi pembawa muatan dan berbanding terbalik dengan permitivitas bahan ( $\epsilon$ ) (Goetzberger et al., 1998). pembawa muatan bahan terdiri atas pembawa muatan elektron dan *hole*, yang di definsikan dengan persamaan

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2.3)$$

sehingga persamaan poisson akan menjadi

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{q(p - n + N_D^+ - N_A^-)}{\epsilon} \quad (2.4)$$

dalam hal ini untuk rapat muatan ( $\rho$ ) sebagai pembawa muatan elektron ( $n$ ) dan pembawa muatan *hole* ( $p$ ) serta konsentrasi donor ( $N_D^+$ ) dan konsentrasi akseptor

( $N_A^+$ ) yang terionisasi. Nilai permitivitas bahan ( $\epsilon$ ) yang bergantung pada konstanta dielektrik bahan (Collinge dan Collinge, 2002).

### 2.5.2 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan

Persamaan kontinuitas menjelaskan hubungan proses generasi, rekombinasi, dan arus listrik akibat dari adanya aliran elektron dan *hole* (Goetzberger et al., 1998). Proses generasi merupakan proses timbulnya pasangan elektron bebas dan *hole* tiap satuan detik per meter kubik. Sedangkan proses rekombinasi merupakan proses bersatunya pasangan elektron dan *hole* tiap satuan detik per meter kubik. Proses generasi dan rekombinasi ini digunakan untuk menghitung besarnya rapat arus untuk elektron maupun *hole*. Persamaan kontinuitas pembawa muatan di tuliskan sebagai berikut:

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n = R - G \quad (2.5)$$

yang merupakan persamaan kontinuitas untuk aliran elektron. Adapun untuk aliran *hole* menggunakan persamaan

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p = G - R \quad (2.6)$$

Keterangan:

$\mathbf{J}_n$  = rapat arus elektron ( $A/cm^2$ )

$\mathbf{J}_p$  = rapat arus *hole* ( $A/cm^2$ )

$G$  = Laju generasi ( $cm^{-2}s^{-1}$ )

$R$  = Laju rekombinasi ( $cm^{-2}s^{-1}$ )

Mekanisme rekombinasi yang terjadi pada bahan semikonduktor galium arsenida disebut rekombinasi radiatif atau sering dikenal dengan *direct recombination*. Rekombinasi radiatif terjadi pada bahan semikonduktor dengan struktur celah pita langsung (*direct bandgap*) dimana elektron dan *hole* berekombinasi disertai dengan radiasi foton (Anonim, 2015).

$$R_c = C_c \int_{E_c}^{\sim} f(E) g_c(E) dE \int_{\sim}^{E_v} (1 - f(E)) g_v(E') dE' = C_c np \quad (2.7)$$

Dengan  $C_c$  = konstanta material (GaAs:  $1 \times 10^{-10} cm^{-3}$ )

$f(E)$	= Fungsi Fermi-dirac
$g_c$	= Rapat keadaan di pita konduksi
$g_v$	= Rapat keadaan di pita valensi

## 2.6 Absorpsi, Emisi Spontan dan Emisi Terstimulasi

Pada suatu atom, elektron dapat berpindah dari kulit yang satu ke kulit yang lain dengan cara menyerap dan memancarkan energi. Energi yang diserap atau dipancarkan ketika elektron berpindah disebut energi foton. Absorpsi, emisi spontan, dan emisi terstimulasi merupakan semua proses yang berhubungan dengan elektron dan foton. Suatu atom akan tereksitasi ketika ia menyerap foton. Atom yang tereksitasi ini dapat turun ke keadaan energi yang lebih rendah bahkan dapat kembali ke keadaan dasarnya melalui proses radiasi. Ada dua proses radiasi yaitu pertama, emisi spontan yang menghasilkan fluoresensi dan fosforesensi. Kedua, emisi terstimulasi yang menghasilkan banyak foton (Saleh dan Teich, 2007).

Absorpsi terjadi ketika foton berinteraksi dengan elektron pada kondisi yang sesuai, dalam hal ini foton akan diserap oleh elektron. Ketika ini terjadi elektron bergerak ke tingkat energi yang lebih tinggi. Saat elektron bergerak ke energi yang lebih tinggi menunjukkan bahwa elektron dalam keadaan tereksitasi (Rasyidi, 2015). Absorpsi sangat berkaitan dengan transmisi karena cahaya yang tidak terabsorpsi akan ditransmisikan melalui medium (Dieter, 2004).

Emisi spontan terjadi ketika sebuah elektron yang berada dalam keadaan tereksitasi bergerak dari level energi yang tinggi ke level energi yang lebih rendah dengan mengeluarkan radiasi foton. Perbedaan emisi spontan dengan emisi terstimulasi yaitu bahwa pada emisi spontan, penurunan energi pada atom terjadi karena inisiatif atom itu sendiri, sedangkan pada emisi terstimulasi, penurunan energi pada atom dikarenakan energi dari luar yang mengenai atom (Lodahl et al., 2004). Rata-rata waktu pergerakan elektron tersebut disebut konstanta waktu emisi spontan ( $t$ ). Energi foton sama dengan perbedaan energi antara dua tingkat energi (Dieter, 1990). Laju penurunan jumlah atom pada tingkat energi tertentu dituliskan sebagai berikut

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{spontan} = -A \cdot N_2 \quad (2.8)$$

sedangkan waktu hidup rata-rata elektron adalah

$$\tau_{spontan} = \frac{1}{A} \quad (2.9)$$

dimana  $N_2$  = jumlah atom pada tingkat energi  $E_2$

$A$  = kemungkinan emisi spontan koefisien Einstein.

Emisi terstimulasi yaitu penurunan energi pada atom dari level energi tinggi ke level energi yang lebih rendah akibat dari energi luar yang mengenai atom (Dieter, 2004). Ada kemungkinan ketika foton yang lewat dapat menyebabkan elektron meluruh dimana foton yang di pancarkan memiliki panjang gelombang dan fase serta arah yang sama dengan elektron. Laju penurunan jumlah atom pada keadaan terstimulasi adalah

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{terstimulasi} = -W_{21} \cdot N_2 \quad (2.10)$$

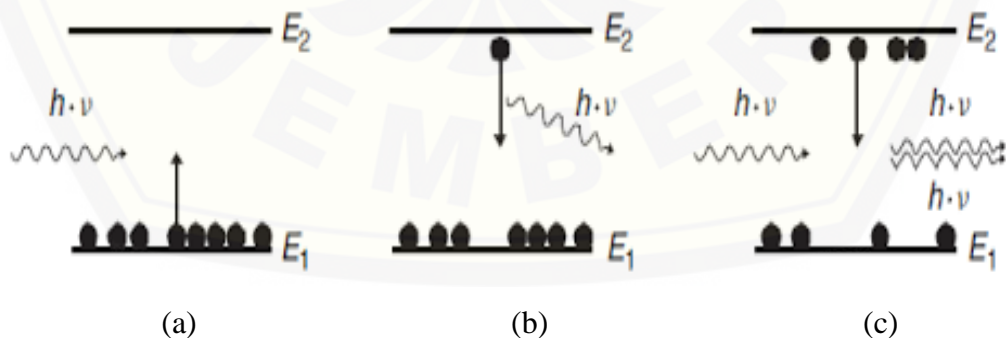
dengan

$$W_{21} = \sigma_{21} \cdot F \quad (2.11)$$

dimana  $\sigma_{21} = \sigma_{12}$  = penampang emisi

$F$  = fluks foton

Absorpsi, emisi spontan, dan emisi terstimulasi digambarkan seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Mekanisme (a) Absorpsi, (b) Emisi Spontan, (d) Emisi Terstimulasi (Lodahl et al., 2004)

Ketika suatu foton berenergi menumbuk elektron pada keadaan dasar maka energi foton akan diserap oleh elektron. Interaksi antar foton dan elektron ini akan mengakibatkan elektron berpindah dari tingkat energi yang rendah ( $E_1$ ) ke tingkat energi yang lebih tinggi ( $E_2$ ). Saat terjadi pergerakan elektron dari  $E_1$  ke  $E_2$ , elektron dikatakan dalam keadaan tereksitasi. Peristiwa ini disebut proses absorpsi (Gambar 2.7 a). Setelah beberapa saat, elektron yang berada dalam keadaan tereksitasi akan bertransisi secara spontan (tanpa pengaruh apapun dari luar) kembali ke keadaan dasarnya ( $E_1$ ) dengan memancarkan/mengemisikan foton. Peristiwa ini disebut emisi spontan dan foton yang dipancarkan memiliki arah dan fasa yang acak (Gambar 2.7 b). Emisi foton selain terjadi secara spontan juga dapat terjadi melalui sebuah stimulasi dari radiasi foton yang frekuensinya sesuai. Radiasi foton yang dipancarkan lebih banyak dari pada saat elektron dalam keadaan tereksitasi, memiliki arah dan fase yang sama, serta polarisasi dan energi yang sama (Gambar 2.7 c). Secara sistematis di tuliskan sebagai berikut:

$$\text{Emisi Spontan: } A^* \rightarrow A + h\nu$$

$$\text{Emisi Terstimulasi: } h\nu + A^* \rightarrow A + 2h\nu$$

Parameter A menunjukkan atom dalam keadaan dasar,  $A^*$  menunjukkan atom dalam keadaan tereksitasi dan  $h\nu$  merupakan energi foton (Siregar, 2016).

Tingkat emisi spontan persatuan volume dan per unit energi  $h\nu$ ,  $\gamma_{\text{spont}}(h\nu)$  dinyatakan oleh persamaan (2.13)

$$\gamma_{\text{spont}}(h\nu) = \int B' \rho_v(-E)[1 - f_v(E)] \times \rho_c(h\nu - E_g + E) f_c(h\nu - E_g + E) dE \quad (2.12)$$

Keterangan:

$\rho_c$  = Rapat keadaan pada pita konduksi

$\rho_v$  = Rapat keadaan pada pita valensi.

$f_c$  = Fungsi Fermi untuk elektron di pita konduksi

$f_v$  = Fungsi Fermi untuk elektron di pita valensi.

$B'$  = Konstanta rekombinasi ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ).

Rekombinasi terjadi pada suatu elektron dalam pita konduksi bergabung kembali dengan *hole* pada pita valensi. E di ukur secara positif dari atas tepi pita

valensi dengan asumsi bahwa terminalisasi untuk elektron dan *hole* lebih pendek dibandingkan dengan masa rekombinasi mereka (Hwang, 1970).

Di dalam diagram pita energi, terdapat dua tingkat quasi-Fermi yakni  $E_{fe}$  untuk elektron dan  $E_{fh}$  untuk *hole*. Fungsi Fermi suatu elektron dalam pita valensi diekspresikan seperti berikut:

$$f_v(E) = \left( 1 + e^{\frac{E+E_{fh}}{kT}} \right)^{-1} \quad (2.13)$$

Sedangkan untuk elektron dalam pita konduksi yaitu

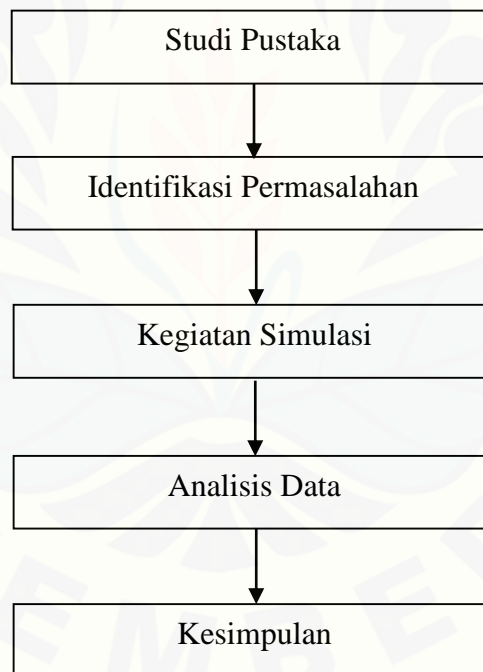
$$f_v(h\nu - E_g + E) = \left( 1 + e^{\frac{h\nu+E-E_g-E_{fc}}{kT}} \right)^{-1} \quad (2.14)$$

Berdasarkan persamaan (2.13) dan (2.14) dapat dianalisis bahwasanya fungsi fermi sebuah elektron baik pada pita valensi maupun pita konduksi dipengaruhi oleh faktor temperatur. Pada saat berada pada pita konduksi, elektron memiliki distribusi energi yang mudah berubah saat mengalami paparan foton. Tingkat energi pada pita energi konduksi juga sangat dipengaruhi oleh jenis bahan, yang di wakili oleh komponen energi *gap*.

### BAB 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Rancangan Penelitian

Kegiatan penelitian di laksanakan mulai bulan April 2020 sampai dengan bulan Juli 2020 di Laboratorium Fisika Komputasi Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Jember. Dalam hal ini, fokus kegiatan adalah melakukan simulasi secara *computerize* untuk mendapatkan fenomena fisis dari formulasi matematis yang telah ditentukan sebelumnya. Adapun rancangan kegiatan penelitian secara umum diilustrasikan dalam bentuk diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir kegiatan penelitian

Penelitian dilakukan untuk mensimulasikan performa dari devais fotodioda semikonduktor paduan murni III-VA yaitu galium arsenida (GaAs). Tahap awal yang dilakukan yaitu studi pustaka untuk mencari dan mengumpulkan informasi dari berbagai referensi terkait dengan penelitian. Selanjutnya dilakukan identifikasi suatu permasalahan terkait emisi spontan pada fotodioda GaAs di daerah cahaya



tampak. Permasalahan yang telah didapatkan selanjutnya di selesaikan melalui kegiatan simulasi menggunakan program komputer. Dalam hal ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan *software COMSOL Multiphysic 5.2a*. Setelah data diperoleh, dilakukan analisis sesuai permasalahan yang ingin di selesaikan. Hasil analisis selanjutnya dapat dijadikan acuan untuk menarik kesimpulan.

### **3.2 Jenis dan Sumber Data**

#### **3.2.1 Jenis Penelitian**

Penelitian yang dilakukan berupa simulasi yang bertujuan untuk melakukan studi analisa mengenai pengaruh variasi panjang gelombang terhadap emisi spontan pada fotodioda GaAs *p-i-n junction*. Hasil penelitian berupa kurva karakteristik nilai daya emisi foton per satuan luas per energi foton datang terhadap energi foton terhambur. Kurva ini dianalisis untuk setiap variasi panjang gelombang foton datang. Hasil penelitian berupa data yang diperoleh berdasarkan perhitungan numerik sehingga penelitian yang dilakukan bersifat kuantitatif.

#### **3.2.2 Sumber Data Penelitian**

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder. Beberapa parameter input bahan diperoleh dari data *sheet* semikonduktor. Rincian data yang digunakan tertera pada Tabel 3.1.

### **3.3 Variabel Penelitian**

Variabel penelitian yang diobservasi adalah daya dari energi foton terhambur di dalam bahan. Perhitungan terhadap daya dilakukan untuk keadaan foton datang dengan variasi panjang gelombang pada spektrum cahaya tampak. Namun demikian, perluasan spektrum juga dilakukan untuk mengetahui bagaimana karakteristik emisi spontan bahan GaAs yang dihasilkan. Oleh karena itu, variasi panjang gelombang dari foton datang diaplikasikan pada interval dari 445 nm hingga 875 nm.

### 3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

#### 3.4.1 Identifikasi Permasalahan dan Studi Pustaka

Identifikasi masalah sebagai awal dari kegiatan penelitian dilakukan pada bulan Februari 2020. Permasalahan yang didapatkan yaitu berapa besarnya daya emisi spontan yang dihasilkan oleh fotodioda GaAs pada daerah spektrum cahaya tampak dari panjang gelombang 445 nm hingga 875 nm. Kegiatan simulasi dilakukan untuk menyelidiki fenomena terjadinya emisi spontan pada devais fotodioda *p-i-n junction* guna memperoleh karakteristik devais fotodioda yang berkaitan dengan performa fotodioda itu sendiri. Persiapan simulasi karakteristik fotodioda meliputi pemilihan bahan dan ukuran devais yang digunakan, penentuan parameter input bahan, dan variasi data yang digunakan untuk menghasilkan emisi spontan pada fotodioda.

#### 3.4.2 Proses Simulasi

Program komputasi yang digunakan untuk simulasi yaitu *software* COMSOL Multiphysic 5.2a untuk memperoleh grafik emisi spontan fotodioda dengan variasi panjang gelombang dalam struktur devais 2D COMSOL Multiphysic merupakan *software* simulasi elemen hingga untuk memsimulasikan berbagai aplikasi fisika dan teknik yang menyediakan alur kerja terpadu untuk aplikasi listrik, mekanik, fluida, akustik, dan kimia. Langkah pertama yang dilakukan adalah mempersiapkan parameter simulasi berupa parameter *input* bahan serta parameter bentuk dan ukuran bahan. Berikutnya dilakukan pembuatan geometri devais fotodioda dengan struktur *p-i-n junction* GaAs menggunakan *software* COMSOL Multiphysic 5.2a, seperti yang di tunjukkan pada Gambar 3.2. Selanjutnya pengaturan kondisi batas dengan tahapan mengatur nilai impuritas setiap lapisan tipe-p dan tipe-n, mengatur kondisi batas lapisan dengan kontak logam dan kondisi batas sambungan antar lapisan. Pengaturan kondisi batas digunakan untuk menyelesaikan persamaan Poisson dan Kontinuitas pembawa muatan. Setelah itu dilakukan pemilihan material yang akan digunakan pada penelitian dan pembuatan *mesh* pada geometri devais. Langkah terakhir kegiatan simulasi yaitu membuat grafik emisi spontan dari

variasi panjang gelombang untuk mengetahui besarnya daya emisi foton yang di hasilkan.

a. Parameter *input*

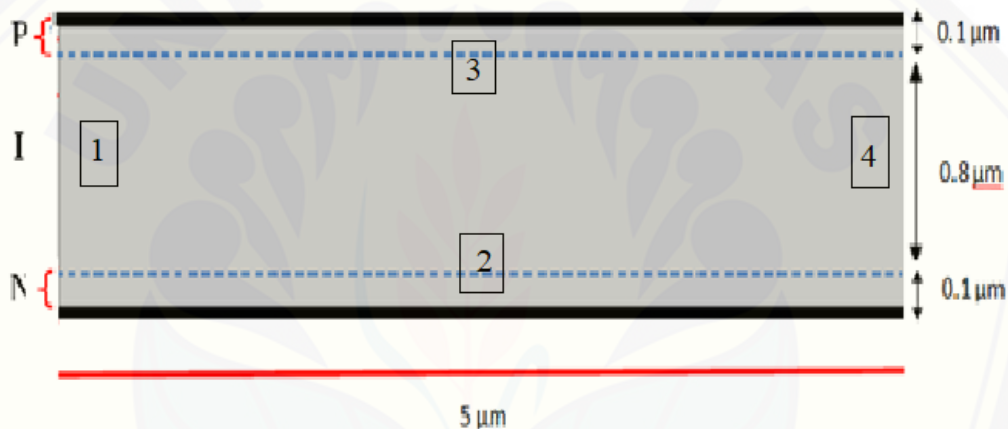
Pada penelitian ini parameter *input* yang digunakan merupakan parameter karakteristik material semikonduktor galium arsenida (GaAs) yang di dapatkan dari referensi baik penelitian eksperimen maupun simulasi yang telah dilakukan sebelumnya. Parameter *input* berupa besaran fisika yang di tunjukkan pada Tabel 3.1 yang merupakan parameter *input* bahan baik pada geometri struktur *multijunction* dan *single-junction*.

Tabel 3.1 Parameter *Input* Simulasi

Label dalam simulasi	Parameter	Nilai
Q	Muatan electron	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
T	Temperatur ruang	300K
w_dom	Lebar devais	$5 \times 10^{-6} \text{ m}$
h_dom	Tebal devais	$1 \times 10^{-6} \text{ m}$
V_n	Tegangan <i>type-n</i>	2 V
V_p	Tegangan <i>type-p</i>	0 V
hbar0	Konstanta plank	$6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$
Lamda0	Panjang gelombang	$8,7 \times 10^{-7} \text{ m}$
F0	Frekuensi	$3,4459 \times 10^{14} \text{ 1/s}$
Omega0	Frekuensi sudut	$2.1651 \times 10^{15} \text{ rad/s}$
E_ph	Energi foton	$2.2833 \times 10^{-19} \text{ J}$
n0	Refraktif index GaAs	3.5
Tau	<i>Lifetime</i> spontan	$2 \times 10^{-9} \text{ s}$
Pin	Daya <i>Input</i>	10 W
Eg0	Energi <i>gap</i>	1,42 eV (Slimane et al.,2013)
N <sub>A0</sub>	Konsentrasi Akseptor	$1 \times 10^{18} \text{ (1/cm}^3\text{)}$
N <sub>D0</sub>	Konsentrasi Donor	$1 \times 10^{18} \text{ (1/cm}^3\text{)}$
d <sub>j</sub>	<i>Junction depth</i>	0,15 $\mu\text{m}$

### b. Geometri Fotodiode GaAs

Struktur fotodiode GaAs di buat dalam dua dimensi. Geometri devais fotodiode dibuat dengan mengatur ukuran devais sesuai dengan parameter *input*. Struktur devais terdiri dari 1 domain yang memiliki 4 batas. Batas 1 dan 4 menunjukkan daerah batas yang tidak terkontak dengan logam. Batas 2 menunjukkan daerah semikonduktor tipe-n yang berbatasan dengan batas logam, sedangkan batas 3 menunjukkan daerah batas semikonduktor tipe-p dengan batas logam. Gometri fotodiode GaAs dapat dimodelkan seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Geometri Fotodiode GaAs

### c. Pengaturan Doping

Ada dua fitur dalam pengaturan doping yaitu fitur doping analitik dan fitur doping geometrik. Fitur doping analitik digunakan untuk menentukan background doping pada lapisan-p dan lapisan-n. Sedangkan, untuk fitur doping geometrik digunakan untuk memberikan doping yang tinggi pada bagian atas dan bawah devais. Model doping geometrik dilakukan untuk menambah efisiensi kontak logam.

### d. Pengaturan Kondisi Batas

Syarat batas pada simulasi digunakan untuk menggambarkan mekanisme transport pembawa muatan. Dalam hal ini dilakukan pengaturan model doping

secara analitik dan geometri pada lapisan semikonduktor. Pengaturan doping secara analitik digunakan untuk memberikan informasi besarnya impuritas dengan mengatur nilai konsentrasi donor dan akseptor pada lapisan tipe-p dan tipe-n. Pengaturan doping secara geometri digunakan untuk membuat lapisan yang akan didoping, yaitu bagian atas dan bawah devais guna menambah efisiensi kontak logam yang dituliskan sebagai berikut:

$$N_A = N_A^{prev} + N_{A0} \exp \left[ - \left( \frac{r}{l_d} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

$$N_D = N_D^{prev} + N_{D0} \exp \left[ - \left( \frac{r}{l_d} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

$$l_d = \frac{d_j}{\sqrt{\ln \left( \left| \frac{N_{A0}}{N_b} \right| \right)}} \quad (3.3)$$

dengan  $N_{AD}$  = Konsentrasi atom akseptor/donor  
 $N_A^{prev} = N_D^{prev}$  = Konsentrasi pembawa muatan bebas  
 $N_{A0} = N_{D0}$  = Konsentrasi dopan pada batas yang diolah secara seragam  
 $N_b$  = Konsentrasi *background* doping  
 $r$  = Jarak profil dopant dari batas yang dipilih geometri  
 $l_d$  = Panjang peluruhan  
 $d_j$  = *Junction depth* ( $\mu\text{m}$ )

(Anonim, 2015).

Persamaan di atas merupakan syarat batas lapisan tipe-p dan tipe-n berdasarkan impuritasnya. Adapun untuk lapisan pada tipe-p, banyaknya impuritas akseptor (*acceptor doping*)  $N_A$  ditentukan oleh hubungan berikut:

$$N_A = N_A^{prev} + N_{A0}, \quad N_D = N_D^{prev} \quad (3.4)$$

Sedangkan pada lapisan tipe-n yang memiliki impuritas donor (*donor doping*)  $N_D$ , memiliki jumlah elektron dengan ketentuan :

$$N_D = N_D^{prev} + N_{D0}, \quad N_A = N_A^{prev} \quad (3.5)$$

Pada geometri, syarat batas untuk permukaan yang tidak terhubung dengan logam dituliskan dalam bentuk vektor medan listrik  $\mathbf{E}$ , rapat arus elektron  $\mathbf{J}_n$  dan rapat arus *hole*  $\mathbf{J}_p$  memiliki ketentuan sebagai berikut :

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (3.6)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_n = 0 \quad (3.7)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_p = 0 \quad (3.8)$$

dengan  $\mathbf{n}$  adalah vektor satuan normal permukaan. Kondisi batas ini disebut dengan kondisi batas Neumann, yang dalam hal ini digunakan untuk daerah 1 dan 4.

Selanjutnya diterapkan kondisi batas kontak logam pada permukaan atas tipe-p dengan tegangan 0V dan permukaan bawah tipe-n dengan tegangan 2V yang telah terbentuk (kondisi batas 2 dan 3). Dalam hal ini digunakan syarat batas Dirichlet untuk menentukan besarnya potensial dan konsentrasi pembawa muatan. Syarat batas Dirichlet dapat dituliskan seperti persamaan dibawah ini:

$$n = \frac{1}{2}(N_d^+ - N_a^-)^2 + \frac{1}{2}\sqrt{(N_d^+ - N_a^-)^2 + 4\gamma_n\gamma_p n_{i,eff}^p} \quad (3.9)$$

$$p = -\frac{1}{2}(N_d^+ - N_a^-)^2 + \frac{1}{2}\sqrt{(N_d^+ - N_a^-)^2 + 4\gamma_n\gamma_p n_{i,eff}^p} \quad (3.10)$$

dengan  $N_d^+$  = konsentrasi atom donor terionisasi ( $\text{cm}^{-3}$ )

$N_a^-$  = konsentrasi atom donor terionisasi ( $\text{cm}^{-3}$ )

$\gamma_n$  = Faktor degenerasi elektron

$\gamma_p$  = Faktor degenerasi *hole*

$n_{i,eff}^p$  = Konsentrasi intrinsik yang efektif

(Anonim, 2015).

#### e. Material dan *Mesh*

Tahapan selanjutnya yaitu pemilihan material yang akan diterapkan pada devais fotodiode. Material yang dipilih adalah semikonduktor Galium Arsenida (GaAs) dengan nilai refraktif index dan masa hidup spontan elektron yang di sesuaikan dengan parameter input pada Tabel 3.1. Selanjutnya yaitu pembuatan *mesh* pada geometri devais dengan distribusi banyaknya elemen yaitu 500.

f. Kurva emisi spontan

Hasil yang di peroleh dari proses simulasi berupa daya emisi spontan fotodioda GaAs pada seluruh keadaan foton terhambur, untuk setiap variasi panjang gelombang dari foton datang. Data yang diperoleh selanjutnya di buat plot data antara daya emisi spontan foton terhambur (di letakkan pada sumbu y) dan besarnya energi foton terhambur (di letakkan pada sumbu x). Variasi panjang gelombang foton datang yang di aplikasikan adalah dari 445 nm hingga 875 nm dengan rentang 10 nm. Total kurva yang di hasilkan berjumlah 44 kurva.

### 3.5 Analisis Data

Hasil yang di dapatkan pada penelitian ini berupa kurva emisi spontan fotodioda GaAs dengan struktur *p-i-n junction*. Kurva emisi spontan menunjukkan hubungan antara besar energi foton yang diemisikan oleh cahaya terhadap daya emisi foton yang di hasilkan fotodioda. Variasi panjang gelombang yang di berikan sebesar 445 nm hingga 875 nm dengan interval 10 nm tiap masing-masing panjang gelombang. Masing-masing variasi nilai menghasilkan grafik emisi spontan yang berbeda-beda. Dari grafik yang di hasilkan di analisa bagaimana pengaruh variasi panjang gelombang foton datang terhadap daya emisi foton pada fotodioda.

Analisis data yang dilakukan dari hasil simulasi meliputi:

1. Analisis terhadap kurva daya emisi spontan pada panjang gelombang foton datang tertentu

Hasil perhitungan terhadap daya emisi spontan (dinyatakan dalam bentuk daya per satuan luas dan energi) untuk setiap foton datang disajikan dalam bentuk grafik. Sumbu x menyatakan energi foton terhambur yang di hasilkan oleh devais sedangkan sumbu y adalah besarnya daya emisi spontan yang dihasilkan oleh foton terhambur. Besarnya foton terhambur dianalisis pada variasi panjang gelombang yang sama dengan foton datang. Analisis dilakukan untuk melihat bagaimana bentuk kurva yang dihasilkan dari setiap foton datang. Namun demikian, komparasi bentuk profil kurva dipilih untuk

4 sampel data yang dipilih secara acak, yakni kurva dengan foton datang dengan panjang gelombang 475 nm, 575 nm, 725 nm dan 875 nm.

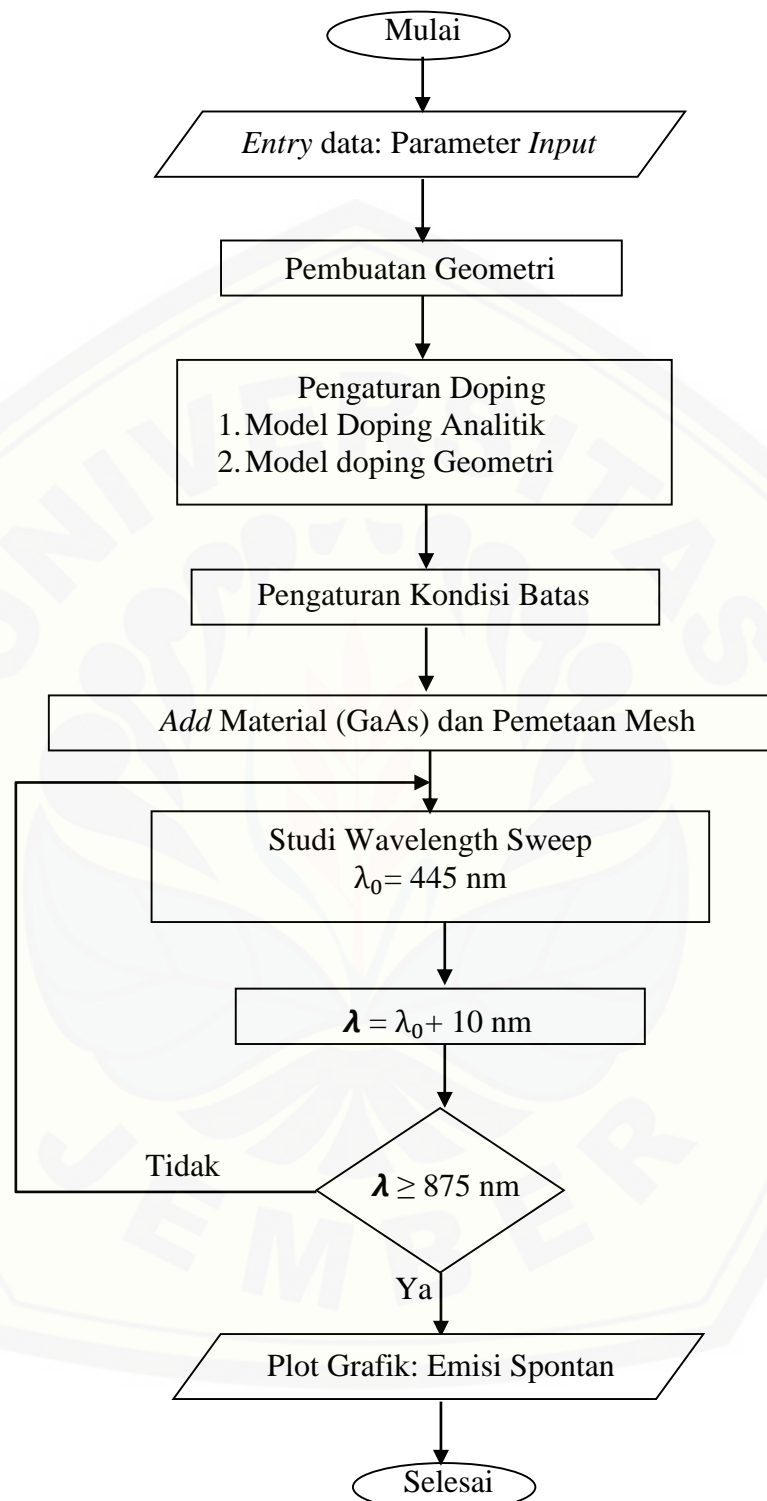
2. Analisis terhadap perubahan daya maksimum emisi spontan pada variasi panjang gelombang foton datang.

Untuk mengetahui pengaruh panjang gelombang foton datang terhadap daya emisi spontan, dilakukan komparasi terhadap data daya maksimum dari emisi spontan untuk setiap foton datang. Dalam hal ini, data-data yang diperlukan untuk keperluan tersebut disajikan dalam bentuk tabel yang berisi data panjang gelombang foton datang, panjang gelombang foton terhambur (berserta energi foton yang bersesuaian), daya maksimum emisi spontan beserta nilai FWHM. Berdasarkan tabel ini, profil perubahan data panjang gelombang foton terhambur dan daya maksimum emisi spontan akan diamati dalam bentuk grafik hubungan kedua parameter tersebut dengan panjang gelombang foton datang.

3. Analisis terhadap nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM) dari parameter daya emisi spontan.

Nilai FWHM digunakan untuk mendeteksi daerah energi foton terhambur yang menghasilkan perubahan terkecil dari daya emisi spontan. FWHM merupakan sebuah kuantitas yang menunjukkan lebar bukit dari sebuah kurva daya yang memiliki nilai setengah dari daya maksimum kurva. Kurva yang diamati berdasarkan nilai FWHM nya yaitu kurva hubungan antara besar energi foton yang dihamburkan oleh devais terhadap daya emisi spontan yang dihasilkan fotodiode. Nilai FWHM dibaca pada daerah interval di sumbu x, yang dalam hal ini merupakan energi foton terhambur. Penentuan daerah interval ini diawali dengan melakukan perhitungan separuh dari daya maksimum (sumbu y), kemudian dibuat garis horizontal yang memotong titik tersebut. Titik potong dari garis ini terhadap kurva daya menghasilkan dua buah titik yang mendefinisikan daerah dari FWHM.





Gambar 3.3 Alur simulasi studi emisi spontan fotodiode GaAs *p-i-n junction*

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari pembahasan yang telah di paparkan pada bagian sebelumnya adalah bahwa:

1. Kurva daya emisi spontan yang dihasilkan oleh GaAs untuk variasi panjang gelombang foton datang memiliki bentuk kurva yang sama namun nilai daya maksimum emisi foton yang dihasilkan berbeda.
2. Pada seluruh foton datang dengan panjang gelombang dari (445-875) nm, tidak terjadi emisi foton datang dengan energi di bawah energi *bandgap* GaAs. Daya maksimum emisi spontan paling besar berada pada panjang gelombang 725 nm dengan energi foton terhambur 1,438 eV.

### 5.2 Saran

Adapun saran atau masukan untuk penelitian selanjutnya yaitu

1. Pada penelitian ini ditampilkan profil daya emisi spontan terhadap energi foton dengan variasi panjang gelombang foton yang datang, sehingga untuk selanjutnya dapat dikembangkan dengan memvariasi ketebalan devais.
2. Penelitian ini hanya mengkaji salah satu peristiwa emisi spontan pada kristal semikonduktor GaAs, sehingga untuk selanjutnya dapat dikaji untuk seluruh peristiwa yang terjadi pada material tersebut agar dapat diketahui lebih banyak mengenai karakteristik dari material tersebut.
3. Penelitian hanya dilakukan pada material semikonduktor GaAs saja, sehingga dapat dilakukan analisis karakteristik emisi spontan untuk material yang lain.
4. Pada penelitian ini bentuk kurva hubungan FWHM dan panjang gelombang berupa pengelompokan data menjadi 6 daerah yang muncul secara otomatis. Oleh karena itu diperlukan kajian lebih lanjut untuk mengetahui profil yang dihasilkan pada fenomena lainnya.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Aditya, L. 2009. Analisis Konsep *Up & Down- Conversion* Menggunakan *Secondary Light Source* Sebagai *Luminescence* Untuk Meningkatkan Efisiensi *Solar Cel*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Agrawal, G. P. 2002. *Fiber Optic Communication System*. Ne York. John Wiley & son Inc.
- Ahmad, W., M. Ali Umar, Laxmi.V, dan S. A. Syed. 2018. Simulation and Characterization of PIN Photodiode for Photonic Application. *Asian Journal of Nanoscience and Materials* 1 (3): 122-134.
- Akinlami, J. O., dan A. O. Ashamu. 2013. Optical properties of GaAs. *Journal of Semiconductors* 34 (3): 1-5.
- Alviati, N. 2015. Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron Kristal Semikonduktor GaAs Pada Peristiwa “Deformation Potential Scattering” Berbasis Metode Elemen Hingga. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Anonim. 2004. *Semiconductor Module User's Guide*  
<https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.semicond/SemiconductorModuleUsersGuide.pdf>.
- Bilshop. 2004. *Dasar-Dasar Elektronika*. Jakarta: Erlangga.
- Collinge, J. P., dan C. A. Collinge. 2002. *Physics of Semikonduktor Devaices*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Danielsson, E. 2000. *FEMLAB Model Library for Semiconductor Device Model*. Stockholm: The Royal Institute of Institute.
- Dieter, M. 2004. *Optics, Light, and Lasers*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Dieter, K. S. 1990. *Semikonduktor Material and Device Characterization*. Singapore: John Wiley & Sons. Inc.
- Flickinger, J., J. X, H. E, dan C. L. 2007. GaliumArsenida Photodiode Simulation. *NUSOD* 1 (3): 39-40.
- Ghafouri-Shiraz, H. 2003. *Distributed feedback laser diodes and optical tunable filters*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

- Goetzberger, A., J. Knobloch, dan B. Voß. 1998. *Crystalline Silicon Solar Cells*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Hamady, M., E. Kamrani, dan M. Sawan. 2012. Modeling CMOS PIN Photodiode using COMSOL. *International Conference on Microelectronics (ICM)*. 1 (1): 1-4.
- Hwang, C. J. 1970. Properties of Spontaneous and Stimulated Emission in GaAs Junction Lasers II. Temperature Dependence of Threshold Current and Excitation Dependence of Superradiance Spectra. *Physical Review* 2 (10): 4126-4134.
- Liouliou, G., X. Meng, J. S. Ng, dan A. M. Barnett. 2016. Characterization of GalliumArsenida X-ray mesa *p-i-n* Photodiodes at room temperature. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 813: 1-9.
- Lodahl, P., A. F. v. Driel, I. S. Nikolaev, A. Irman, K. Overgaag, D. Vanmaekelbergh, dan W. L. Vos. 2004. Controlling the dynamics of spontaneous emission from quantum dots by photonic crystals. *Nature* 430 (7000): 654-657.
- Nasution, N., A. Supriyanto, dan S. W. Suciati. 2015. Implementasi Sensor Fotodiode sebagai Pendeteksi Serapan Sinar Infra Merah Pada Kaca. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* 3 (2): 111-116.
- Pilkhun, M., dan H. Rupprecht. 1966. Spontaneous and Stimulated Emission from GaAs Diodes with Three-Layer Structures. *Journal of Applied Physics* 37 (9): 3621-3628.
- Rasyidi, M. 2015. Analisis Sifat Optik dari Campuran serbuk SiO<sub>2</sub> – ZnO dengan Variasi Suhu Sebagai Alternatif Bahan Semikonduktor Pada Sel Surya, Malang, Universitas Islam Malang.
- Riski, D. D., B. Arfianti Fahmi, dan Vinsensius Sigit. 2019. Analisis Of The Effect Of Full Width Half maximum Terhadap Jarak Maksimal Antara Source Ke Receiver Pada Sistem Visible Light Communication. *e-Proceeding of Engineering6* (2): 3285-3292.
- Saleh, B. E. A dan M, C Teich. 2007. *Fundamental of Photonics Second Edition*. New Jersey: Wiley.
- Setyaningsih, E., P. Dhidik, dan Suryono. 2017. Penggunaan Sensor Photodiode sebagai Sistem Deteksi Api pada Wahana Terbang Vertical Take-Off Landing (VTOL). *Teknik ELEktro* 9 (2): 53-59.

- Sinaga, P. 2006. *Fisika Modern*. Bandung:Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI.
- Singh, J. (2007). *Electronic and optoelectronic properties of semiconductor structures*. Cambridge University Press.
- Siregar, E. 2016. *Rambatan Gelombang Optik dalam Medium Tipis*. Bandung: UNPAD press.
- Slimane, H. B., B. Dennai. A. Helmaoui. 2013. Numerical Simulation of Graded Band Gap Gaas/Algaas Heterojunction Solar Cell By AMPS-ID. *Advances in physics Theories and Applications*.22.
- Sutrisno. 1986. *Elektronika Teori dan Penerapannya Jilid 1*. Bandung: ITB.
- Sze S M. 1985. *Semikonduktor Devaices (Physics and Technology)*. New York: John Wiely & Sons.
- Takahashi, K., dan M. K. M. 1986. Amorphous Silicon Solar Cell. *North Oxford Academia Publishers Ltd, London*: 14-17, 45-53, dan 97-122.
- Zemansky, M. W., dan F. W. Sears. 2003. *Fisika Universitas Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 475 nm

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m <sup>2</sup> s)
1	1,31	0	29	1,62	4.52 x 10 <sup>17</sup>
2	1,32	0	30	1,64	2.98 x 10 <sup>17</sup>
3	1,33	0	31	1,65	1.96 x 10 <sup>17</sup>
4	0,01	0	32	1,66	1.29 x 10 <sup>17</sup>
5	1,35	0	33	1,67	8.47 x 10 <sup>16</sup>
6	1,36	0	34	0,17	5.55 x 10 <sup>16</sup>
7	1,37	0	35	1,69	3.64 x 10 <sup>16</sup>
8	1,38	0	36	1,70	2.38 x 10 <sup>16</sup>
9	1,40	0	37	1,72	1.56 x 10 <sup>16</sup>
10	1,41	0	38	1,73	1.02 x 10 <sup>16</sup>
11	1,42	0	39	1,74	6.65 x 10 <sup>15</sup>
12	1,43	1.15 x 10 <sup>20</sup>	40	1,75	4.34 x 10 <sup>15</sup>
13	1,44	1.62 x 10 <sup>20</sup>	41	1,76	2.83 x 10 <sup>15</sup>
14	0,15	1.35 x 10 <sup>20</sup>	42	1,77	1.84 x 10 <sup>15</sup>
15	1,46	1.02 x 10 <sup>20</sup>	43	1,78	1.20 x 10 <sup>15</sup>
16	1,48	7.40 x 10 <sup>19</sup>	44	0,18	7.81 x 10 <sup>14</sup>
17	1,49	5.24 x 10 <sup>19</sup>	45	1,81	5.08 x 10 <sup>14</sup>
18	1,50	3.65 x 10 <sup>19</sup>	46	1,82	3.30 x 10 <sup>14</sup>
19	1,51	2.52 x 10 <sup>19</sup>	47	1,83	2.15 x 10 <sup>14</sup>
20	1,52	1.72 x 10 <sup>19</sup>	48	1,84	1.40 x 10 <sup>14</sup>
21	1,53	1.16 x 10 <sup>19</sup>	49	1,85	9.06 x 10 <sup>13</sup>
22	1,54	7.85 x 10 <sup>18</sup>	50	1,86	5.88 x 10 <sup>13</sup>
23	1,56	5.27 x 10 <sup>18</sup>	51	1,88	3.82 x 10 <sup>13</sup>
24	0,16	3.52 x 10 <sup>18</sup>	52	1,89	2.48 x 10 <sup>13</sup>
25	1,58	2.35 x 10 <sup>18</sup>	53	1,90	1.61 x 10 <sup>13</sup>
26	1,59	1.56 x 10 <sup>18</sup>	54	0,19	1.04 x 10 <sup>13</sup>
27	1,60	1.03 x 10 <sup>18</sup>	55	1,92	6.75 x 10 <sup>12</sup>
28	1,61	6.85 x 10 <sup>17</sup>	56	1,93	4.37 x 10 <sup>12</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m2s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m2s)
57	1,94	$2.83 \times 10^{12}$	90	2,32	1.510.251.661
58	1,95	$1.83 \times 10^{12}$	91	2,33	9.725.698.462
59	1,97	$1.19 \times 10^{12}$	92	2,34	6.262.497.381
60	1,98	$7.68 \times 10^{11}$	93	0,24	4.032.093.463
61	1,99	$4.97 \times 10^{11}$	94	2,37	2.595.797.446
62	2,00	$3.22 \times 10^{11}$	95	2,38	1.670.971.572
63	2,01	$2.08 \times 10^{11}$	96	2,39	1.075.539.248
64	0,20	$1.34 \times 10^{11}$	97	2,40	6.922.184.451
65	2,03	$8.69 \times 10^{10}$	98	2,41	4.454.722.168
66	2,05	$5.62 \times 10^{10}$	99	2,42	2.866.549.211
67	2,06	$3.63 \times 10^{10}$	100	2,43	1.844.421.816
68	2,07	$2.34 \times 10^{10}$	101	2,45	1.186.653.309
69	2,08	$1.51 \times 10^{10}$	102	0,25	7.728.880.401
70	2,09	$9.78 \times 10^9$	103	2,47	5.033.562.502
71	2,10	$6.32 \times 10^9$	104	2,48	3.277.940.402
72	2,11	$4.08 \times 10^9$	105	2,49	2.134.489.129
73	0,21	$2.63 \times 10^9$	106	2,50	1.473.142.263
74	2,14	$1.70 \times 10^9$	107	0,25	1.016.650.837
75	2,15	$1.10 \times 10^9$	108	2,52	7.015.774.787
76	2,16	$7.07 \times 10^8$	109	2,53	4.841.239.833
77	2,17	$4.56 \times 10^8$	110	2,54	3.581.196.978
78	2,18	$2.94 \times 10^8$	111	0,03	2.649.019.211
79	2,19	$1.90 \times 10^8$	112	2,55	1.959.419.719
80	2,21	$1.22 \times 10^8$	113	2,56	144.929.064
81	2,22	$7.89 \times 10^7$	114	2,56	1.168.015.181
82	2,23	$5.09 \times 10^7$	115	2,57	9.413.135.144
83	0,22	$3.28 \times 10^7$	116	2,58	7.586.003.466
84	2,25	$2.11 \times 10^7$	117	2,58	6.113.423.875
85	2,26	$1.36 \times 10^7$	118	2,59	5.239.916.125
86	2,27	8.771.956.211	119	2,59	4.491.181.181
87	2,29	5.651.410.274	120	2,59	3.849.402.372
88	2,30	3.640.561.658	121	2,60	3.299.305.143
89	2,31	2.344.942.571	122	2,60	2.907.223.087

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)
123	2,60	2.561.721.22	156	2,80	0.013100473
124	2,61	2.257.268.09	157	2,81	0.009809402
125	2,61	1.988.987.30	158	2,81	0.007344949
126	2,61	1.752.582.88	159	2,82	0.005499529
127	2,62	1.544.268.42	160	2,83	0.004117687
128	2,62	1.360.707.41	161	0,28	0.003082989
129	2,62	1.198.959.14	162	2,84	0.002308244
130	2,63	1.030.368.46	163	2,85	0.001728153
131	2,63	8.854.771.79	164	2,86	0.001293821
132	2,63	7.609.551.93	165	2,87	9.69 x 10 <sup>-04</sup>
133	2,64	6.539.393.58	166	2,87	7.25 x 10 <sup>-04</sup>
134	0,26	5.309.923.58	167	2,88	5.43 x 10 <sup>-04</sup>
135	2,65	4.311.545.96	168	2,89	4.06 x 10 <sup>-04</sup>
136	2,65	3.500.836.46	169	2,90	3.04 x 10 <sup>-04</sup>
137	2,66	2.842.528.09	170	2,90	2.28 x 10 <sup>-04</sup>
138	2,67	2.177.589.55	171	2,91	1.70 x 10 <sup>-04</sup>
139	2,67	1.668.160.75	172	0,29	1.28 x 10 <sup>-04</sup>
140	2,68	1.277.880.97	173	2,93	9.55 x 10 <sup>-04</sup>
141	2,69	0.97888898	174	2,93	7.15 x 10 <sup>-05</sup>
142	2,70	0.737477568	175	2,94	5.35 x 10 <sup>-05</sup>
143	2,70	0.555589446	176	2,95	4.01 x 10 <sup>-05</sup>
144	2,71	0.418551326	177	2,96	3.00 x 10 <sup>-05</sup>
145	2,72	0.315306948	178	2,96	2.24 x 10 <sup>-05</sup>
146	2,72	0.23615532	179	2,97	1.68 x 10 <sup>-05</sup>
147	2,73	0.176869004	180	0,30	1.26 x 10 <sup>-05</sup>
148	2,74	0.132463235	181	2,98	9.41 x 10 <sup>-06</sup>
149	2,75	0.099203948	182	2,99	7.04 x 10 <sup>-06</sup>
150	2,75	0.074293767	183	3,00	5.27 x 10 <sup>-06</sup>
151	2,76	0.055637279	184	3,01	3.94 x 10 <sup>-06</sup>
152	2,77	0.04166483	185	3,01	2.95 x 10 <sup>-06</sup>
153	0,28	0.031200632	186	3,02	2.21 x 10 <sup>-06</sup>
154	2,78	0.023364019	187	3,03	1.65 x 10 <sup>-06</sup>
155	2,79	0.017495322	188	3,04	1.24 x 10 <sup>-06</sup>



No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m <sup>2</sup> s)
189	3,04	9.26 x 10 <sup>-07</sup>	222	3,29	6.42 x 10 <sup>-11</sup>
190	3,05	6.93 x 10 <sup>-07</sup>	223	3,30	4.80 x 10 <sup>-11</sup>
191	0,03	5.18 x 10 <sup>-07</sup>	224	3,31	3.59 x 10 <sup>-11</sup>
192	3,07	3.88 x 10 <sup>-07</sup>	225	3,31	2.69 x 10 <sup>-11</sup>
193	3,07	2.90 x 10 <sup>-07</sup>	226	3,32	2.01 x 10 <sup>-11</sup>
194	3,08	2.17 x 10 <sup>-07</sup>	227	3,33	1.50 x 10 <sup>-11</sup>
195	3,09	1.63 x 10 <sup>-07</sup>	228	3,33	1.12 x 10 <sup>-11</sup>
196	3,10	1.22 x 10 <sup>-07</sup>	229	0,33	8.41 x 10 <sup>-12</sup>
197	3,10	9.10 x 10 <sup>-08</sup>	230	3,35	6.29 x 10 <sup>-12</sup>
198	3,11	6.81 x 10 <sup>-08</sup>	231	3,36	4.70 x 10 <sup>-12</sup>
199	0,31	5.09 x 10 <sup>-08</sup>	232	3,36	3.52 x 10 <sup>-12</sup>
200	3,13	3.81 x 10 <sup>-08</sup>	233	3,37	2.63 x 10 <sup>-12</sup>
201	3,13	2.85 x 10 <sup>-08</sup>	234	3,38	1.97 x 10 <sup>-12</sup>
202	3,14	2.13 x 10 <sup>-08</sup>	235	3,39	1.47 x 10 <sup>-12</sup>
203	3,15	1.60 x 10 <sup>-08</sup>	236	3,39	1.10 x 10 <sup>-12</sup>
204	3,16	1.19 x 10 <sup>-08</sup>	237	0,34	8.23 x 10 <sup>-13</sup>
205	3,16	8.93 x 10 <sup>-09</sup>	238	3,41	6.15 x 10 <sup>-13</sup>
206	3,17	6.68 x 10 <sup>-09</sup>	239	3,42	4.60 x 10 <sup>-13</sup>
207	3,18	5.00 x 10 <sup>-09</sup>	240	3,42	3.44 x 10 <sup>-13</sup>
208	3,19	3.74 x 10 <sup>-09</sup>	241	3,43	2.57 x 10 <sup>-13</sup>
209	3,19	2.80 x 10 <sup>-09</sup>	242	3,44	1.92 x 10 <sup>-13</sup>
210	0,32	2.09 x 10 <sup>-09</sup>	243	3,45	1.44 x 10 <sup>-13</sup>
211	3,21	1.57 x 10 <sup>-09</sup>	244	3,45	1.08 x 10 <sup>-13</sup>
212	3,22	1.17 x 10 <sup>-09</sup>	245	3,46	8.05 x 10 <sup>-14</sup>
213	3,22	8.76 x 10 <sup>-10</sup>	246	3,47	6.02 x 10 <sup>-14</sup>
214	3,23	6.56 x 10 <sup>-10</sup>	247	3,48	4.50 x 10 <sup>-14</sup>
215	3,24	4.90 x 10 <sup>-10</sup>	248	0,35	3.36 x 10 <sup>-14</sup>
216	3,25	3.67 x 10 <sup>-10</sup>	249	3,49	2.52 x 10 <sup>-14</sup>
217	3,25	2.74 x 10 <sup>-10</sup>	250	3,50	1.78 x 10 <sup>-14</sup>
218	0,33	2.05 x 10 <sup>-10</sup>	251	0,04	1.26 x 10 <sup>-14</sup>
219	3,27	1.54 x 10 <sup>-10</sup>	252	3,52	8.88 x 10 <sup>-15</sup>
220	3,28	1.15 x 10 <sup>-10</sup>	253	3,53	6.28 x 10 <sup>-15</sup>
221	3,28	8.59 x 10 <sup>-11</sup>	254	0,35	3.82 x 10 <sup>-15</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m2s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m2s)
255	3,55	$2.32 \times 10^{-15}$	288	4,63	$1.19 \times 10^{-33}$
256	0,36	$1.41 \times 10^{-15}$	289	0,47	$2.52 \times 10^{-34}$
257	3,58	$8.61 \times 10^{-16}$	290	4,71	$5.34 \times 10^{-35}$
258	3,60	$4.23 \times 10^{-16}$	291	4,75	$1.13 \times 10^{-35}$
259	3,61	$2.08 \times 10^{-16}$	292	4,79	$2.40 \times 10^{-36}$
260	3,63	$1.02 \times 10^{-16}$	293	4,83	$5.10 \times 10^{-37}$
261	3,65	$5.00 \times 10^{-17}$	294	4,87	$1.08 \times 10^{-37}$
262	0,37	$1.86 \times 10^{-17}$	295	4,90	$2.29 \times 10^{-38}$
263	3,70	$6.89 \times 10^{-18}$	296	4,94	$4.85 \times 10^{-39}$
264	3,73	$2.55 \times 10^{-18}$	297	4,98	$1.03 \times 10^{-39}$
265	3,75	$9.47 \times 10^{-19}$	298	5,02	$2.18 \times 10^{-40}$
266	3,78	$2.72 \times 10^{-19}$	299	0,51	$4.61 \times 10^{-41}$
267	0,38	$7.82 \times 10^{-20}$	300	5,10	$9.74 \times 10^{-41}$
268	3,85	$2.25 \times 10^{-20}$	301	5,14	$2.09 \times 10^{-42}$
269	3,88	$6.45 \times 10^{-21}$	302	5,18	$4.41E \times 10^{-43}$
270	3,92	$1.41 \times 10^{-21}$	303	5,22	$9.19 \times 10^{-44}$
271	3,96	$3.08 \times 10^{-22}$	304	5,26	$1.94 \times 10^{-44}$
272	0,40	$6.73 \times 10^{-23}$	305	5,30	$4.21 \times 10^{-45}$
273	4,03	$1.47 \times 10^{-23}$	306	5,34	$8.90 \times 10^{-46}$
274	4,07	$3.12 \times 10^{-24}$	307	5,38	$1.90 \times 10^{-46}$
275	4,11	$6.64 \times 10^{-25}$	308	5,42	$3.91 \times 10^{-47}$
276	4,15	$1.41 \times 10^{-25}$	309	0,55	$8.21 \times 10^{-48}$
277	4,19	$3.00 \times 10^{-26}$	310	5,50	$1.79 \times 10^{-48}$
278	4,23	$6.38 \times 10^{-27}$	311	5,54	$3.82 \times 10^{-49}$
279	0,43	$1.36 \times 10^{-27}$	312	5,58	$7.86 \times 10^{-50}$
280	4,31	$2.88 \times 10^{-28}$	313	5,62	$1.76 \times 10^{-50}$
281	4,35	$6.12 \times 10^{-29}$	314	5,66	$3.32 \times 10^{-51}$
282	4,39	$1.30 \times 10^{-29}$	315	5,70	$6.97 \times 10^{-52}$
283	4,43	$2.76 \times 10^{-30}$	316	5,74	$1.76 \times 10^{-52}$
284	4,47	$5.85 \times 10^{-31}$	317	5,77	$3.53 \times 10^{-53}$
285	4,51	$1.24 \times 10^{-31}$	318	5,81	$6.67 \times 10^{-54}$
286	4,55	$2.64 \times 10^{-32}$	319	0,59	$1.68 \times 10^{-54}$
287	4,59	$5.60 \times 10^{-33}$	320	5,89	$2.82 \times 10^{-55}$

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m <sup>2</sup> s)
321	5,93	7.09 x 10 <sup>-56</sup>	346	6,92	0
322	5,97	1.78 x 10 <sup>-56</sup>	347	6,96	0
323	6,01	2.24 x 10 <sup>-57</sup>	348	7,00	0
324	6,05	5.64 x 10 <sup>-58</sup>	349	7,04	0
325	6,09	1.42 x 10 <sup>-58</sup>	350	0,71	0
326	6,13	3.57 x 10 <sup>-59</sup>	351	7,12	0
327	6,17	8.98 x 10 <sup>-60</sup>	352	7,16	0
328	6,21	2.26 x 10 <sup>-60</sup>	353	7,20	0
329	0,62	0	354	7,24	0
330	6,29	0	355	7,28	0
331	6,33	0	356	7,32	0
332	6,37	0	357	7,36	0
333	6,41	0	358	7,40	0
334	6,45	0	359	7,44	0
335	6,49	0	360	0,75	0
336	6,53	0	361	7,51	0
337	6,57	0	362	7,55	0
338	6,60	0	363	7,59	0
339	0,66	0	364	7,63	0
340	6,68	0	365	7,67	0
341	6,72	0	366	7,71	0
342	6,76	0	367	7,75	0
343	6,80	0	368	7,79	0
344	6,84	0	369	7,83	0
345	6,88	0			

Lampiran 2. Data daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 575 nm

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)
1	1,08	0	31	1,36	0
2	1,09	0	32	1,37	0
3	1,10	0	33	1,38	0
4	1,11	0	34	1,39	0
5	1,12	0	35	1,40	0
6	1,13	0	36	1,41	0
7	1,13	0	37	1,42	0
8	1,14	0	38	1,43	1.28737 x 10 <sup>20</sup>
9	1,15	0	39	1,44	2.87013 x 10 <sup>20</sup>
10	1,16	0	40	1,45	2.95057 x 10 <sup>20</sup>
11	1,17	0	41	1,45	2.45674 x 10 <sup>20</sup>
12	1,18	0	42	1,46	1.94579 x 10 <sup>20</sup>
13	1,19	0	43	1,47	1.4983 x 10 <sup>20</sup>
14	1,20	0	44	1,48	1.13276 x 10 <sup>20</sup>
15	1,21	0	45	1,49	8.4543 x 10 <sup>19</sup>
16	1,22	0	46	1,50	6.24968 x 10 <sup>19</sup>
17	1,23	0	47	1,51	4.58592 x 10 <sup>19</sup>
18	1,24	0	48	1,52	3.34534 x 10 <sup>19</sup>
19	1,25	0	49	1,53	2.42868 x 10 <sup>19</sup>
20	1,26	0	50	1,54	1.75619 x 10 <sup>19</sup>
21	1,27	0	51	1,55	1.26563 x 10 <sup>19</sup>
22	1,28	0	52	1,56	9.09483 x 10 <sup>18</sup>
23	1,29	0	53	1,57	6.51923 x 10 <sup>18</sup>
24	1,29	0	54	1,58	4.66284 x 10 <sup>18</sup>
25	0,13	0	55	1,59	3.32864 x 10 <sup>18</sup>
26	1,31	0	56	1,60	2.37214 x 10 <sup>18</sup>
27	1,32	0	57	1,61	1.6879 x 10 <sup>18</sup>
28	0,13	0	58	1,61	1.19937 x 10 <sup>18</sup>
29	1,34	0	59	0,16	8.51171 x 10 <sup>17</sup>
30	1,35	0	60	1,63	6.03372 x 10 <sup>17</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m <sup>2</sup> s)
61	1,64	4.27268 x 10 <sup>17</sup>	96	0,20	1.74711 x 10 <sup>12</sup>
62	0,17	3.02274 x 10 <sup>17</sup>	97	1,98	1.21946 x 10 <sup>12</sup>
63	1,66	2.13657 x 10 <sup>17</sup>	98	1,99	8.51024 x 10 <sup>11</sup>
64	1,67	1.50897 x 10 <sup>17</sup>	99	0,20	5.93809 x 10 <sup>11</sup>
65	0,17	1.06492 x 10 <sup>17</sup>	100	2,01	4.14272 x 10 <sup>11</sup>
66	1,69	7.51008 x 10 <sup>16</sup>	101	2,02	2.88973 x 10 <sup>11</sup>
67	1,70	5.29284 x 10 <sup>16</sup>	102	2,03	2.03587 x 10 <sup>11</sup>
68	0,17	3.72791 x 10 <sup>16</sup>	103	0,20	1.43411 x 10 <sup>11</sup>
69	1,72	2.62417 x 10 <sup>16</sup>	104	2,05	1.01009 x 10 <sup>11</sup>
70	1,73	1.84622 x 10 <sup>16</sup>	105	2,06	71134723801
71	1,74	1.29824 x 10 <sup>16</sup>	106	0,21	52532123764
72	1,75	9.12462 x 10 <sup>15</sup>	107	2,07	38790801285
73	1,76	6.4103 x 10 <sup>15</sup>	108	2,08	28641376064
74	1,77	4.50147 x 10 <sup>15</sup>	109	2,09	21145655548`
75	1,78	3.15976 x 10 <sup>15</sup>	110	2,09	16524430374
76	1,78	2.21709 x 10 <sup>15</sup>	111	0,21	12912424573
77	1,79	1.55509 x 10 <sup>15</sup>	112	2,11	10089402419
78	1,80	1.09036 x 10 <sup>15</sup>	113	2,11	7883151017
79	1,81	7.64264 x 10 <sup>14</sup>	114	2,12	6607221168
80	1,82	5.3552 x 10 <sup>14</sup>	115	2,12	5537659869
81	1,83	3.75124 x 10 <sup>14</sup>	116	2,13	4641114410
82	1,84	2.62692 x 10 <sup>14</sup>	117	2,13	3889618067
83	1,85	1.83906 x 10 <sup>14</sup>	118	2,14	3428449425
84	1,86	1.28715 x 10 <sup>14</sup>	119	2,14	3021919434
85	1,87	9.00634 x 10 <sup>13</sup>	120	2,14	2663559525
86	1,88	6.30028 x 10 <sup>13</sup>	121	2,15	2347666254
87	1,89	4.40624 x 10 <sup>13</sup>	122	2,15	2116674641
88	1,90	3.08088 x 10 <sup>13</sup>	123	2,15	1908394531
89	1,91	2.1537 x 10 <sup>13</sup>	124	2,15	1720594595
90	1,92	1.50523 x 10 <sup>13</sup>	125	2,16	1551262512
91	1,93	1.05179 x 10 <sup>13</sup>	126	2,16	1398583568
92	1,94	7.34803 x 10 <sup>12</sup>	127	2,16	1260921199
93	0,19	5.13248 x 10 <sup>12</sup>	128	0,22	1136799577
94	1,95	3.58429 x 10 <sup>12</sup>	129	2,17	1024887756
95	1,96	2.50265 x 10 <sup>12</sup>	130	2,17	905274057.4

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)
131	2,17	799611112.1	166	2,37	3.565.370.729
132	2,18	706272981.7	167	2,38	2.811.352.105
133	2,18	623823041.3	168	2,39	2.216.735.704
134	2,18	525987252.7	169	2,39	1.747.836.549
135	2,19	443485928.1	170	2,40	1.378.085.229
136	2,19	373917153.2	171	2,40	1.086.525.325
137	2,20	315254974.3	172	2,41	8.566.279.377
138	2,20	253423832.4	173	0,24	675.356.898
139	2,21	203712923.9	174	2,42	5.324.309.578
140	2,21	163747814	175	2,43	4.197.418.352
141	0,22	131618951.9	176	2,44	3.308.950.591
142	2,23	104359435.3	177	2,44	2.608.479.961
143	2,23	82742681.44	178	2,45	2.056.241.205
144	2,24	65601268.6	179	0,25	1.620.876.825
145	2,24	52009159.2	180	2,46	1.277.660.569
146	2,25	41036915.58	181	2,47	1.007.095.378
147	2,26	32378322.37	182	2,47	7.938.079.513
148	0,23	25545763.82	183	2,48	6.256.768.916
149	2,27	20154340.04	184	2,48	4.931.451.398
150	2,28	15900235.88	185	2,49	3.886.774.997
151	2,28	12543653.94	186	2,50	306.333.275
152	2,29	9.895.328.924	187	2,50	2.414.288.646
153	2,29	7.805.886.732	188	2,51	1.902.718.572
154	0,23	6.157.441.429	189	2,52	1.499.513.284
155	2,31	4.856.959.992	190	2,52	1.181.725.389
156	2,31	3831026	191	2,53	9.312.652.608
157	2,32	3021705.99	192	2,53	7.338.730.545
158	2,32	2.383.285.014	193	2,54	5.783.080.921
159	2,33	1879691.57	194	2,55	4.557.098.774
160	0,23	1.482.464.142	195	2,55	3.590.943.324
161	2,34	1.169.146.483	196	2,56	2.829.564.983
162	2,35	9.220.212.837	197	2,56	2.229.574.223
163	2,36	7.271.104.834	198	0,26	175.677.178
164	2,36	5.733.864.265	199	2,58	138.420.381
165	2,37	4.521.495.734	200	2,58	1.090.626.638

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m <sup>2</sup> s)
201	2,59	8.592.975.388	236	2,80	0.020212863
202	2,59	6.770.215.649	237	2,81	0.015915855
203	2,60	5.333.999.844	238	2,82	0.012532153
204	0,26	4.202.378.789	239	2,82	0.009867678
205	2,61	3.310.770.987	240	2,83	0.007769592
206	2,62	2.608.283.433	241	2,83	0.006117517
207	2,63	2.054.813.266	242	0,28	0.004816659
208	2,63	1.618.757.537	243	2,85	0.003792369
209	2,64	1.275.214.838	244	2,85	0.002985858
210	2,64	1.004.562.288	245	2,86	0.002350831
211	2,65	7.913.389.307	246	2,87	0.001850836
212	2,66	6.233.622.196	247	2,87	0.001457164
213	2,66	4.910.329.118	248	0,29	0.001147211
214	2,67	3.867.881.012	249	2,88	0.000903175
215	2,67	3.046.688.492	250	2,89	0.000678908
216	2,68	2.399.801.714	251	0,29	0.000510319
217	0,27	1.890.232.368	252	2,91	0.000383587
218	2,69	1.488.838.901	253	2,91	0.000288322
219	2,70	1.172.661.864	254	2,92	0.000191599
220	2,71	0.92361413	255	2,93	0.000127318
221	2,71	0.727446542	256	2,94	8.46004 x 10 <sup>-05</sup>
222	2,72	0.57293376	257	2,96	5.62133 x 10 <sup>-05</sup>
223	0,27	0.451232885	258	2,97	3.13106 x 10 <sup>-05</sup>
224	2,73	0.355377475	259	2,99	1.74386 x 10 <sup>-05</sup>
225	2,74	0.279880049	260	0,30	9.71183 x 10 <sup>-05</sup>
226	2,74	0.220418083	261	3,02	5.40829 x 10 <sup>-05</sup>
227	2,75	0.173586306	262	3,04	2.39148 x 10 <sup>-05</sup>
228	2,75	0.13670265	263	3,06	1.05734 x 10 <sup>-05</sup>
229	0,28	0.107654342	264	3,08	4.6742 x 10 <sup>-07</sup>
230	2,77	0.084777263	265	3,10	2.06607 x 10 <sup>-07</sup>
231	2,77	0.066760657	266	3,13	7.40214 x 10 <sup>-08</sup>
232	2,78	0.052572071	267	3,15	2.65147 x 10 <sup>-08</sup>
233	2,79	0.041398359	268	3,18	9.49586 x 10 <sup>-09</sup>
234	2,79	0.032599012	269	3,20	3.40019 x 10 <sup>-09</sup>
235	2,80	0.025669613	270	3,24	9.71861 x 10 <sup>-10</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m2s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m2s)
271	3,27	$2.77712 \times 10^{-10}$	286	3,76	$1.41593 \times 10^{-18}$
272	3,30	$7.93372 \times 10^{-11}$	287	3,79	$3.94725 \times 10^{-19}$
273	3,33	$2.26597 \times 10^{-11}$	288	3,82	$1.10019 \times 10^{-19}$
274	3,37	$6.33348 \times 10^{-12}$	289	3,86	$3.06603 \times 10^{-20}$
275	3,40	$1.76982 \times 10^{-12}$	290	3,89	$8.54286 \times 10^{-21}$
276	3,43	$4.94441 \times 10^{-13}$	291	0,39	$2.37997 \times 10^{-21}$
277	3,46	$1.38104 \times 10^{-13}$	292	3,95	$6.62906 \times 10^{-22}$
278	3,50	$3.85657 \times 10^{-14}$	293	3,99	$1.84628 \times 10^{-20}$
279	3,53	$1.07673 \times 10^{-14}$	294	4,02	$5.14109 \times 10^{-23}$
280	3,56	$3.00552 \times 10^{-15}$	295	4,05	$1.43141 \times 10^{-23}$
281	3,59	$8.38772 \times 10^{-16}$	296	4,08	$3.9846 \times 10^{-24}$
282	3,63	$2.34039 \times 10^{-16}$	297	4,12	$1.10903 \times 10^{-24}$
283	0,37	$6.52896 \times 10^{-17}$	298	4,15	$3.08668 \times 10^{-25}$
284	3,69	$1.82106 \times 10^{-17}$	299	0,42	$8.58899 \times 10^{-26}$
285	3,73	$5.07838 \times 10^{-18}$	300	4,22	$2.38959 \times 10^{-26}$



Lampiran 3. Data daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 725 nm

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)
1	0.86	0	29	1.06	0
2	0.86	0	30	1.07	0
3	0.87	0	31	1.08	0
4	0.88	0	32	1.09	0
5	0.88	0	33	1.09	0
6	0.89	0	34	1.10	0
7	0.90	0	35	1.11	0
8	0.91	0	36	1.12	0
9	0.91	0	37	1.12	0
10	0.92	0	38	1.13	0
11	0.93	0	39	1.14	0
12	0.94	0	40	1.15	0
13	0.94	0	41	1.15	0
14	0.95	0	42	1.16	0
15	0.96	0	43	1.17	0
16	0.97	0	44	1.18	0
17	0.97	0	45	1.18	0
18	0.98	0	46	1.19	0
19	0.99	0	47	1.20	0
20	1.00	0	48	1.21	0
21	1.00	0	49	1.21	0
22	1.01	0	50	1.22	0
23	1.02	0	51	1.23	0
24	1.03	0	52	1.24	0
25	1.03	0	53	1.24	0
26	1.04	0	54	1.25	0
27	1.05	0	55	1.26	0
28	1.06	0	56	1.27	0

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m <sup>2</sup> s)
57	1.27	0	90	1.52	5.31 x 10 <sup>19</sup>
58	1.28	0	91	1.53	4.12 x 10 <sup>19</sup>
59	1.29	0	92	1.53	3.19 x 10 <sup>19</sup>
60	1.30	0	93	1.54	2.46 x 10 <sup>19</sup>
61	1.30	0	94	1.55	1.90 x 10 <sup>19</sup>
62	1.31	0	95	1.56	1.46 x 10 <sup>19</sup>
63	1.32	0	96	1.56	1.12 x 10 <sup>19</sup>
64	1.33	0	97	1.57	8.61 x 10 <sup>18</sup>
65	1.33	0	98	1.58	6.60 x 10 <sup>18</sup>
66	1.34	0	99	1.59	5.05 x 10 <sup>18</sup>
67	1.35	0	100	1.59	3.86 x 10 <sup>18</sup>
68	1.36	0	101	1.60	2.95 x 10 <sup>18</sup>
69	1.36	0	102	1.61	2.27 x 10 <sup>18</sup>
70	1.37	0	103	1.62	1.74 x 10 <sup>18</sup>
71	1.38	0	104	1.62	1.34 x 10 <sup>18</sup>
72	1.39	0	105	1.63	1.03 x 10 <sup>18</sup>
73	1.39	0	106	1.64	8.15 x 10 <sup>17</sup>
74	1.40	0	107	1.64	6.47 x 10 <sup>17</sup>
75	1.41	0	108	1.65	5.14 x 10 <sup>17</sup>
76	1.42	0	109	1.66	4.08 x 10 <sup>17</sup>
77	1.42	0	110	1.66	3.38 x 10 <sup>17</sup>
78	1.43	3.25 x 10 <sup>20</sup>	111	1.67	2.80 x 10 <sup>17</sup>
79	1.44	4.58 x 10 <sup>20</sup>	112	1.67	2.32 x 10 <sup>17</sup>
80	1.45	4.55 x 10 <sup>20</sup>	113	1.68	1.92 x 10 <sup>17</sup>
81	1.45	3.97 x 10 <sup>20</sup>	114	1.68	1.68 x 10 <sup>17</sup>
82	1.46	3.33 x 10 <sup>20</sup>	115	1.68	1.47 x 10 <sup>17</sup>
83	1.47	2.74 x 10 <sup>20</sup>	116	1.69	1.28 x 10 <sup>17</sup>
84	1.48	2.21 x 10 <sup>20</sup>	117	1.69	1.12 x 10 <sup>17</sup>
85	1.48	1.77 x 10 <sup>20</sup>	118	1.69	1.02 x 10 <sup>17</sup>
86	1.49	1.41 x 10 <sup>20</sup>	119	1.70	9.22 x 10 <sup>16</sup>
87	1.50	1.11 x 10 <sup>20</sup>	120	1.70	8.37 x 10 <sup>16</sup>
88	1.50	8.72 x 10 <sup>19</sup>	121	1.70	7.60 x 10 <sup>16</sup>
89	1.51	6.81 x 10 <sup>19</sup>	122	1.70	7.02 x 10 <sup>16</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)
123	1.71	6.48 x 10 <sup>16</sup>	156	1.83	5.31 x 10 <sup>14</sup>
124	1.71	5.98 x 10 <sup>16</sup>	157	1.84	4.42 x 10 <sup>14</sup>
125	1.71	5.53 x 10 <sup>16</sup>	158	1.84	3.67 x 10 <sup>14</sup>
126	1.71	5.10 x 10 <sup>16</sup>	159	1.85	3.05 x 10 <sup>14</sup>
127	1.71	4.71 x 10 <sup>16</sup>	160	1.85	2.54 x 10 <sup>14</sup>
128	1.72	4.35 x 10 <sup>16</sup>	161	1.86	2.11 x 10 <sup>14</sup>
129	1.72	4.02 x 10 <sup>16</sup>	162	1.86	1.75 x 10 <sup>14</sup>
130	1.72	3.65 x 10 <sup>16</sup>	163	1.87	1.46 x 10 <sup>14</sup>
131	1.72	3.32 x 10 <sup>16</sup>	164	1.87	1.21 x 10 <sup>14</sup>
132	1.73	3.02 x 10 <sup>16</sup>	165	1.88	1.01 x 10 <sup>14</sup>
133	1.73	2.74 x 10 <sup>16</sup>	166	1.88	8.37 x 10 <sup>13</sup>
134	1.73	2.40 x 10 <sup>16</sup>	167	1.89	6.96 x 10 <sup>13</sup>
135	1.74	2.11 x 10 <sup>16</sup>	168	1.89	5.78 x 10 <sup>13</sup>
136	1.74	1.85 x 10 <sup>16</sup>	169	1.90	4.80 x 10 <sup>13</sup>
137	1.74	1.62 x 10 <sup>16</sup>	170	1.90	3.99 x 10 <sup>13</sup>
138	1.75	1.37 x 10 <sup>16</sup>	171	1.91	3.31 x 10 <sup>13</sup>
139	1.75	1.16 x 10 <sup>16</sup>	172	1.91	2.75 x 10 <sup>13</sup>
140	1.76	9.76 x 10 <sup>15</sup>	173	1.92	2.29 x 10 <sup>13</sup>
141	1.76	8.25 x 10 <sup>15</sup>	174	1.92	1.90 x 10 <sup>13</sup>
142	1.77	6.89 x 10 <sup>15</sup>	175	1.93	1.58 x 10 <sup>13</sup>
143	1.77	5.76 x 10 <sup>15</sup>	176	1.93	1.31 x 10 <sup>13</sup>
144	1.78	4.81 x 10 <sup>15</sup>	177	1.94	1.09 x 10 <sup>13</sup>
145	1.78	4.02 x 10 <sup>15</sup>	178	1.94	9.04 x 10 <sup>12</sup>
146	1.78	3.35 x 10 <sup>15</sup>	179	1.95	7.51 x 10 <sup>12</sup>
147	1.79	2.79 x 10 <sup>15</sup>	180	1.95	6.23 x 10 <sup>12</sup>
148	1.79	2.32 x 10 <sup>15</sup>	181	1.96	5.18 x 10 <sup>12</sup>
149	1.80	1.93 x 10 <sup>15</sup>	182	1.96	4.30 x 10 <sup>12</sup>
150	1.80	1.60 x 10 <sup>15</sup>	183	1.97	3.57 x 10 <sup>12</sup>
151	1.81	1.34 x 10 <sup>15</sup>	184	1.97	2.96 x 10 <sup>12</sup>
152	1.81	1.11 x 10 <sup>15</sup>	185	1.98	2.46 x 10 <sup>12</sup>
153	1.82	9.24 x 10 <sup>14</sup>	186	1.98	2.04 x 10 <sup>12</sup>
154	1.82	7.68 x 10 <sup>14</sup>	187	1.98	1.69 x 10 <sup>12</sup>
155	1.83	6.39 x 10 <sup>14</sup>	188	1.99	1.41 x 10 <sup>12</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m2s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m2s)
255	2.33	3285447.324	288	3.03	4.36 x 10 <sup>-06</sup>
256	2.34	2381909.973	289	3.06	1.59 x 10 <sup>-06</sup>
257	2.34	1726762.188	290	3.08	5.79 x 10 <sup>-07</sup>
258	2.36	1089524.77	291	3.11	2.11 x 10 <sup>-07</sup>
259	2.37	687376.9956	292	3.14	7.69 x 10 <sup>-08</sup>
260	2.38	433617.9066	293	3.16	2.80 x 10 <sup>-09</sup>
261	2.39	273510.941	294	3.19	1.02 x 10 <sup>-08</sup>
262	2.41	143870.3179	295	3.21	3.72 x 10 <sup>-09</sup>
263	2.42	75663.27011	296	3.24	1.35 x 10 <sup>-09</sup>
264	2.44	39784.9413	297	3.27	4.93 x 10 <sup>-10</sup>
265	2.46	20915.79007	298	3.29	1.79 x 10 <sup>-10</sup>
266	2.48	9318.265299	299	3.32	6.53 x 10 <sup>-11</sup>
267	2.50	4150.303632	300	3.34	2.37 x 10 <sup>-11</sup>
268	2.52	1848.044557	301	3.37	8.64 x 10 <sup>-12</sup>
269	2.54	822.6903141	302	3.39	3.14 x 10 <sup>-12</sup>
270	2.57	306.6047185	303	3.42	1.14 x 10 <sup>-12</sup>
271	2.59	114.227495	304	3.45	4.16 x 10 <sup>-13</sup>
272	2.62	42.54194857	305	3.47	1.51 x 10 <sup>-13</sup>
273	2.64	15.83887096	306	3.50	5.50 x 10 <sup>-14</sup>
274	2.67	5.796584554	307	3.52	2.00 x 10 <sup>-14</sup>
275	2.70	2.120729287	308	3.55	7.26 x 10 <sup>-15</sup>
276	2.72	0.775654018	309	3.58	2.64 x 10 <sup>-15</sup>
277	2.75	0.283612184	310	3.60	9.59 x 10 <sup>-16</sup>
278	2.77	0.103671592	311	3.63	3.49 x 10 <sup>-16</sup>
279	2.80	0.037885821	312	3.65	1.27 x 10 <sup>-16</sup>
280	2.82	0.013841382	313	3.68	4.60 x 10 <sup>-17</sup>
281	2.85	0.005055583	314	3.71	1.67 x 10 <sup>-17</sup>
282	2.88	0.001846102	315	3.73	6.07 x 10 <sup>-18</sup>
283	2.90	0.000673963	316	3.76	2.20 x 10 <sup>-18</sup>
284	2.93	0.000245988	317	3.78	8.00 x 10 <sup>-19</sup>
285	2.95	8.98 x 10 <sup>-05</sup>	318	3.81	2.91 x 10 <sup>-19</sup>
286	2.98	3.27 x 10 <sup>-05</sup>	319	3.84	1.05 x 10 <sup>-19</sup>
287	3.01	1.19 x 10 <sup>-05</sup>	320	3.86	3.83 x 10 <sup>-20</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m2s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m2s)
321	3.89	$1.39 \times 10^{-20}$	346	4.53	$1.34 \times 10^{-31}$
322	3.91	$5.04 \times 10^{-21}$	347	4.56	$4.85 \times 10^{-32}$
323	3.94	$1.83 \times 10^{-21}$	348	4.59	$1.76 \times 10^{-32}$
324	3.96	$6.64 \times 10^{-22}$	349	4.61	$6.36 \times 10^{-33}$
325	3.99	$2.41 \times 10^{-22}$	350	4.64	$2.30 \times 10^{-33}$
326	4.02	$8.74 \times 10^{-23}$	351	4.66	$8.34 \times 10^{-34}$
327	4.04	$3.17 \times 10^{-23}$	352	4.69	$3.02 \times 10^{-34}$
328	4.07	$1.15 \times 10^{-23}$	353	4.72	$1.09 \times 10^{-34}$
329	4.09	$4.17 \times 10^{-24}$	354	4.74	$3.96 \times 10^{-35}$
330	4.12	$1.51 \times 10^{-24}$	355	4.77	$1.43 \times 10^{-35}$
331	4.15	$5.48 \times 10^{-25}$	356	4.79	$5.19 \times 10^{-36}$
332	4.17	$1.99 \times 10^{-25}$	357	4.82	$1.87 \times 10^{-36}$
333	4.20	$7.21 \times 10^{-26}$	358	4.85	$6.79 \times 10^{-37}$
334	4.22	$2.61 \times 10^{-26}$	359	4.87	$2.46 \times 10^{-37}$
335	4.25	$9.47 \times 10^{-27}$	360	4.90	$8.90 \times 10^{-38}$
336	4.28	$3.43 \times 10^{-27}$	361	4.92	$3.21 \times 10^{-38}$
337	4.30	$1.24 \times 10^{-27}$	362	4.95	$1.16 \times 10^{-38}$
338	4.33	$4.51 \times 10^{-28}$	363	4.97	$4.22 \times 10^{-39}$
339	4.35	$1.63 \times 10^{-28}$	364	5.00	$1.53 \times 10^{-39}$
340	4.38	$5.92 \times 10^{-29}$	365	5.03	$5.51 \times 10^{-40}$
341	4.41	$2.15 \times 10^{-29}$	366	5.05	$1.99 \times 10^{-40}$
342	4.43	$7.78 \times 10^{-30}$	367	5.08	$7.20 \times 10^{-41}$
343	4.46	$2.82 \times 10^{-30}$	368	5.10	$2.61 \times 10^{-41}$
344	4.48	$1.02 \times 10^{-30}$	369	5.13	$9.47 \times 10^{-42}$
345	4.51	$3.70 \times 10^{-31}$			

Lampiran 4. Data daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 855 nm

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m <sup>2</sup> s)
1	0.73	0	29	0.90	0
2	0.73	0	30	0.91	0
3	0.74	0	31	0.92	0
4	0.74	0	32	0.92	0
5	0.75	0	33	0.93	0
6	0.76	0	34	0.93	0
7	0.76	0	35	0.94	0
8	0.77	0	36	0.95	0
9	0.78	0	37	0.95	0
10	0.78	0	38	0.96	0
11	0.79	0	39	0.97	0
12	0.79	0	40	0.97	0
13	0.80	0	41	0.98	0
14	0.81	0	42	0.98	0
15	0.81	0	43	0.99	0
16	0.82	0	44	1.00	0
17	0.83	0	45	1.00	0
18	0.83	0	46	1.01	0
19	0.84	0	47	1.02	0
20	0.85	0	48	1.02	0
21	0.85	0	49	1.03	0
22	0.86	0	50	1.04	0
23	0.86	0	51	1.04	0
24	0.87	0	52	1.05	0
25	0.88	0	53	1.05	0
26	0.88	0	54	1.06	0
27	0.89	0	55	1.07	0
28	0.90	0	56	1.07	0

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)
57	1.08	0	90	1.29	0
58	1.09	0	91	1.30	0
59	1.09	0	92	1.30	0
60	1.10	0	93	1.31	0
61	1.11	0	94	1.31	0
62	1.11	0	95	1.32	0
63	1.12	0	96	1.33	0
64	1.12	0	97	1.33	0
65	1.13	0	98	1.34	0
66	1.14	0	99	1.35	0
67	1.14	0	100	1.35	0
68	1.15	0	101	1.36	0
69	1.16	0	102	1.36	0
70	1.16	0	103	1.37	0
71	1.17	0	104	1.38	0
72	1.17	0	105	1.38	0
73	1.18	0	106	1.39	0
74	1.19	0	107	1.39	0
75	1.19	0	108	1.40	0
76	1.20	0	109	1.40	0
77	1.21	0	110	1.41	0
78	1.21	0	111	1.41	0
79	1.22	0	112	1.42	0
80	1.23	0	113	1.42	0
81	1.23	0	114	1.42	2.20 x 10 <sup>19</sup>
82	1.24	0	115	1.43	5.43 x 10 <sup>19</sup>
83	1.24	0	116	1.43	7.57 x 10 <sup>19</sup>
84	1.25	0	117	1.43	9.06 x 10 <sup>19</sup>
85	1.26	0	118	1.44	9.76 x 10 <sup>19</sup>
86	1.26	0	119	1.44	1.02 x 10 <sup>19</sup>
87	1.27	0	120	1.44	1.03 x 10 <sup>19</sup>
88	1.28	0	121	1.44	1.03 x 10 <sup>19</sup>
89	1.28	0	122	1.44	1.01 x 10 <sup>19</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m <sup>2</sup> s)
123	1.45	9.82 x 10 <sup>19</sup>	156	1.55	3.48 x 10 <sup>18</sup>
124	1.45	9.51 x 10 <sup>19</sup>	157	1.56	3.01 x 10 <sup>18</sup>
125	1.45	9.19 x 10 <sup>19</sup>	158	1.56	2.60 x 10 <sup>18</sup>
126	1.45	8.86 x 10 <sup>19</sup>	159	1.57	2.25 x 10 <sup>18</sup>
127	1.45	8.52 x 10 <sup>19</sup>	160	1.57	1.94 x 10 <sup>18</sup>
128	1.46	8.18 x 10 <sup>19</sup>	161	1.58	1.67 x 10 <sup>18</sup>
129	1.46	7.83 x 10 <sup>19</sup>	162	1.58	1.44 x 10 <sup>18</sup>
130	1.46	7.43 x 10 <sup>19</sup>	163	1.58	1.25 x 10 <sup>18</sup>
131	1.46	7.03 x 10 <sup>19</sup>	164	1.59	1.07 x 10 <sup>18</sup>
132	1.46	6.65 x 10 <sup>19</sup>	165	1.59	9.26 x 10 <sup>17</sup>
133	1.47	6.27 x 10 <sup>19</sup>	166	1.60	7.98 x 10 <sup>17</sup>
134	1.47	5.78 x 10 <sup>19</sup>	167	1.60	6.87 x 10 <sup>17</sup>
135	1.47	5.32 x 10 <sup>19</sup>	168	1.60	5.92 x 10 <sup>17</sup>
136	1.47	4.88 x 10 <sup>19</sup>	169	1.61	5.09 x 10 <sup>17</sup>
137	1.48	4.47 x 10 <sup>19</sup>	170	1.61	4.38 x 10 <sup>17</sup>
138	1.48	3.99 x 10 <sup>19</sup>	171	1.62	3.77 x 10 <sup>17</sup>
139	1.49	3.55 x 10 <sup>19</sup>	172	1.62	3.24 x 10 <sup>17</sup>
140	1.49	3.15 x 10 <sup>19</sup>	173	1.63	2.79 x 10 <sup>17</sup>
141	1.49	2.80 x 10 <sup>19</sup>	174	1.63	2.40 x 10 <sup>17</sup>
142	1.50	2.46 x 10 <sup>19</sup>	175	1.63	2.06 x 10 <sup>17</sup>
143	1.50	2.16 x 10 <sup>19</sup>	176	1.64	1.77 x 10 <sup>17</sup>
144	1.51	1.89 x 10 <sup>19</sup>	177	1.64	1.52 x 10 <sup>17</sup>
145	1.51	1.65 x 10 <sup>19</sup>	178	1.65	1.31 x 10 <sup>17</sup>
146	1.51	1.44 x 10 <sup>19</sup>	179	1.65	1.12 x 10 <sup>17</sup>
147	1.52	1.25 x 10 <sup>19</sup>	180	1.65	9.66 x 10 <sup>16</sup>
148	1.52	1.09 x 10 <sup>19</sup>	181	1.66	8.29 x 10 <sup>16</sup>
149	1.53	9.48 x 10 <sup>18</sup>	182	1.66	7.12 x 10 <sup>16</sup>
150	1.53	8.23 x 10 <sup>18</sup>	183	1.67	6.11 x 10 <sup>16</sup>
151	1.53	7.15 x 10 <sup>18</sup>	184	1.67	5.25 x 10 <sup>16</sup>
152	1.54	6.20 x 10 <sup>18</sup>	185	1.67	4.50 x 10 <sup>16</sup>
153	1.54	5.37 x 10 <sup>18</sup>	186	1.68	3.86 x 10 <sup>16</sup>
154	1.55	4.65 x 10 <sup>18</sup>	187	1.68	3.31 x 10 <sup>16</sup>
155	1.55	4.02 x 10 <sup>18</sup>	188	1.69	2.84 x 10 <sup>16</sup>



No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)
189	1.69	2.44 x 10 <sup>16</sup>	222	1.83	1.46 x 10 <sup>14</sup>
190	1.70	2.09 x 10 <sup>16</sup>	223	1.83	1.25 x 10 <sup>14</sup>
191	1.70	1.79 x 10 <sup>16</sup>	224	1.84	1.07 x 10 <sup>14</sup>
192	1.70	1.54 x 10 <sup>16</sup>	225	1.84	9.13 x 10 <sup>13</sup>
193	1.71	1.32 x 10 <sup>16</sup>	226	1.84	7.81 x 10 <sup>13</sup>
194	1.71	1.13 x 10 <sup>16</sup>	227	1.85	6.68 x 10 <sup>13</sup>
195	1.72	9.69 x 10 <sup>15</sup>	228	1.85	5.71 x 10 <sup>13</sup>
196	1.72	8.30 x 10 <sup>15</sup>	229	1.86	4.88 x 10 <sup>13</sup>
197	1.72	7.11 x 10 <sup>15</sup>	230	1.86	4.17 x 10 <sup>13</sup>
198	1.73	6.10 x 10 <sup>15</sup>	231	1.87	3.57 x 10 <sup>13</sup>
199	1.73	5.22 x 10 <sup>15</sup>	232	1.87	3.05 x 10 <sup>13</sup>
200	1.74	4.47 x 10 <sup>15</sup>	233	1.87	2.61 x 10 <sup>13</sup>
201	1.74	3.83 x 10 <sup>15</sup>	234	1.88	2.23 x 10 <sup>13</sup>
202	1.75	3.28 x 10 <sup>15</sup>	235	1.88	1.90 x 10 <sup>13</sup>
203	1.75	2.81 x 10 <sup>15</sup>	236	1.89	1.63 x 10 <sup>13</sup>
204	1.75	2.41 x 10 <sup>15</sup>	237	1.89	1.39 x 10 <sup>13</sup>
205	1.76	2.06 x 10 <sup>15</sup>	238	1.89	1.19 x 10 <sup>13</sup>
206	1.76	1.77 x 10 <sup>15</sup>	239	1.90	1.02 x 10 <sup>13</sup>
207	1.77	1.51 x 10 <sup>15</sup>	240	1.90	8.68 x 10 <sup>12</sup>
208	1.77	1.29 x 10 <sup>15</sup>	241	1.91	7.42 x 10 <sup>12</sup>
209	1.77	1.11 x 10 <sup>15</sup>	242	1.91	6.34 x 10 <sup>12</sup>
210	1.78	9.48 x 10 <sup>14</sup>	243	1.91	5.42 x 10 <sup>12</sup>
211	1.78	8.12 x 10 <sup>14</sup>	244	1.92	4.63 x 10 <sup>12</sup>
212	1.79	6.95 x 10 <sup>14</sup>	245	1.92	3.95 x 10 <sup>12</sup>
213	1.79	5.95 x 10 <sup>14</sup>	246	1.93	3.38 x 10 <sup>12</sup>
214	1.79	5.09 x 10 <sup>14</sup>	247	1.93	2.89 x 10 <sup>12</sup>
215	1.80	4.35 x 10 <sup>14</sup>	248	1.94	2.47 x 10 <sup>12</sup>
216	1.80	3.73 x 10 <sup>14</sup>	249	1.94	2.11 x 10 <sup>12</sup>
217	1.81	3.19 x 10 <sup>14</sup>	250	1.94	1.75 x 10 <sup>12</sup>
218	1.81	2.73 x 10 <sup>14</sup>	251	1.95	1.45 x 10 <sup>12</sup>
219	1.82	2.33 x 10 <sup>14</sup>	252	1.95	1.20 x 10 <sup>12</sup>
220	1.82	2.00 x 10 <sup>14</sup>	253	1.96	9.92 x 10 <sup>11</sup>
221	1.82	1.71 x 10 <sup>14</sup>	254	1.97	7.58 x 10 <sup>11</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m2s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi Spontan (/m2s)
255	1.97	5.79 x 10 <sup>11</sup>	288	2.57	57.82260591
256	1.98	4.42 x 10 <sup>11</sup>	289	2.59	24.67596692
257	1.99	3.38 x 10 <sup>11</sup>	290	2.62	10.52792292
258	2.00	2.29 x 10 <sup>11</sup>	291	2.64	4.490625792
259	2.01	1.56 x 10 <sup>11</sup>	292	2.66	1.915003214
260	2.02	1.06 x 10 <sup>11</sup>	293	2.68	0.816458091
261	2.03	7.19 x 10 <sup>10</sup>	294	2.70	0.348018817
262	2.04	4.19 x 10 <sup>10</sup>	295	2.72	0.14831288
263	2.06	2.44 x 10 <sup>10</sup>	296	2.75	0.063192422
264	2.07	1.42 x 10 <sup>10</sup>	297	2.77	0.02691927
265	2.08	8.30 x 10 <sup>09</sup>	298	2.79	0.01146506
266	2.10	4.21 x 10 <sup>09</sup>	299	2.81	0.004882095
267	2.12	2.13 x 10 <sup>09</sup>	300	2.83	0.002078526
268	2.14	1.08 x 10 <sup>09</sup>	301	2.86	8.85 x 10 <sup>-04</sup>
269	2.16	5.46 x 10 <sup>08</sup>	302	2.88	3.77 x 10 <sup>-04</sup>
270	2.18	2.38 x 10 <sup>08</sup>	303	2.90	1.60 x 10 <sup>-04</sup>
271	2.20	1.04 x 10 <sup>08</sup>	304	2.92	6.82 x 10 <sup>-05</sup>
272	2.22	4.52 x 10 <sup>07</sup>	305	2.94	2.90 x 10 <sup>-05</sup>
273	2.24	1.97 x 10 <sup>07</sup>	306	2.97	1.23 x 10 <sup>-05</sup>
274	2.26	8431805.963	307	2.99	5.24 x 10 <sup>-06</sup>
275	2.29	3614814.815	308	3.01	2.23 x 10 <sup>-06</sup>
276	2.31	1549066.951	309	3.03	9.48 x 10 <sup>-07</sup>
277	2.33	663560.7093	310	3.05	4.03 x 10 <sup>-07</sup>
278	2.35	284134.9589	311	3.08	1.71 x 10 <sup>-07</sup>
279	2.37	121621.1157	312	3.10	7.28 x 10 <sup>-08</sup>
280	2.40	52040.2927	313	3.12	3.09 x 10 <sup>-08</sup>
281	2.42	22259.8867	314	3.14	1.31 x 10 <sup>-08</sup>
282	2.44	9518.40227	315	3.16	5.58 x 10 <sup>-09</sup>
283	2.46	4068.81816	316	3.19	2.37 x 10 <sup>-09</sup>
284	2.48	1738.763369	317	3.21	1.01 x 10 <sup>-09</sup>
285	2.51	742.8228979	318	3.23	4.27 x 10 <sup>-10</sup>
286	2.53	317.2539333	319	3.25	1.81 x 10 <sup>-10</sup>
287	2.55	135.4596416	320	3.27	7.70 x 10 <sup>-11</sup>

No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)	No	Energi Foton terhambur (eV)	Daya emisi spontan (/m <sup>2</sup> s)
321	3.30	3.27 x 10 <sup>11</sup>	346	3.85	1.57 x 10 <sup>-20</sup>
322	3.32	1.39 x 10 <sup>11</sup>	347	3.87	6.65 x 10 <sup>-21</sup>
323	3.34	5.89 x 10 <sup>12</sup>	348	3.89	2.82 x 10 <sup>-21</sup>
324	3.36	2.50 x 10 <sup>12</sup>	349	3.91	1.19 x 10 <sup>-21</sup>
325	3.38	1.06 x 10 <sup>12</sup>	350	3.93	5.05 x 10 <sup>-22</sup>
326	3.41	4.49 x 10 <sup>13</sup>	351	3.95	2.1 x 10 <sup>-22</sup>
327	3.43	1.91 x 10 <sup>13</sup>	352	3.98	9.05 x 10 <sup>-23</sup>
328	3.45	8.09 x 10 <sup>14</sup>	353	4.00	3.83 x 10 <sup>-23</sup>
329	3.47	3.43 x 10 <sup>14</sup>	354	4.02	1.62 x 10 <sup>-23</sup>
330	3.49	1.45 x 10 <sup>14</sup>	355	4.04	6.86 x 10 <sup>-24</sup>
331	3.52	6.17 x 10 <sup>15</sup>	356	4.06	2.90 x 10 <sup>-24</sup>
332	3.54	2.61 x 10 <sup>15</sup>	357	4.09	1.23 x 10 <sup>-24</sup>
333	3.56	1.11 x 10 <sup>15</sup>	358	4.11	5.20 x 10 <sup>-25</sup>
334	3.58	4.70 x 10 <sup>16</sup>	359	4.13	2.20 x 10 <sup>-25</sup>
335	3.60	1.99 x 10 <sup>16</sup>	360	4.15	9.30 x 10 <sup>-26</sup>
336	3.63	8.44 x 10 <sup>17</sup>	361	4.17	3.94 x 10 <sup>-26</sup>
337	3.65	3.58 x 10 <sup>17</sup>	362	4.20	1.66 x 10 <sup>-26</sup>
338	3.67	1.52 x 10 <sup>17</sup>	363	4.22	7.04 x 10 <sup>-27</sup>
339	3.69	6.42 x 10 <sup>18</sup>	364	4.24	2.98 x 10 <sup>-27</sup>
340	3.71	2.72 x 10 <sup>18</sup>	365	4.26	1.26 x 10 <sup>-27</sup>
341	3.74	1.15 x 10 <sup>18</sup>	366	4.28	5.33 x 10 <sup>-28</sup>
342	3.76	4.88 x 10 <sup>19</sup>	367	4.31	2.25 x 10 <sup>-28</sup>
343	3.78	2.07 x 10 <sup>19</sup>	368	4.33	9.53 x 10 <sup>-29</sup>
344	3.80	8.76 x 10 <sup>20</sup>	369	4.35	4.03 x 10 <sup>-29</sup>
345	3.82	3.71 x 10 <sup>20</sup>			

Lampiran 5. Kurva FWHM daya emisi spontan terhadap energi foton terhambur saat dikenai foton datang dengan panjang gelombang 475 nm.

Tahapan untuk menentukan FWHM adalah sebagai berikut

1. Pada grafik data, ditarik garis vertikal dari maksimum puncak ke garis dasar (sumbu x).
2. Lalu, panjang garis vertikal tersebut diukur dan dibagi 2 untuk mencari pusat garis.
3. Selanjutnya, dibuat garis yang melewati pusat garis horizontal yang sejajar dengan garis dasar (sumbu x). Panjang garis tersebut yang memotong kurva di dua tempat diukur sebagai nilai FWHM.

