

## Studi Awal MEMS pada Mikrofabrikasi Divais Transistor Bipolar NPN

Aminuddin Debataraja<sup>1\*</sup>, Latif Mawardi<sup>1</sup>, dan Robeth V. Manurung<sup>2</sup>

1. Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Depok 16425, Indonesia  
2. Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, LIPI, Bandung 40135, Indonesia

\*E-mail: adebataraja@yahoo.com

---

### Abstrak

Transistor merupakan divais yang selama ini telah banyak digunakan serta memiliki peran yang cukup penting di dalam dunia elektronika khususnya dalam bidang rangkaian terintegrasi (IC). Transistor bipolar merupakan divais elektronik yang terdiri atas tiga terminal, emitor, kolektor, dan basis, yang membentuk dua buah *p-n junction*. Prinsip dasar kerja transistor bipolar adalah arus yang mengalir pada basis akan mengendalikan arus pada kolektor dan emitter. Keunggulan utama dari transistor dengan teknologi bipolar adalah kecepatan *switching*-nya yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi MOS serta kemampuannya untuk dapat mengalirkan arus yang tinggi. Dalam tulisan ini dijelaskan proses desain dan simulasi proses fabrikasi transistor bipolar tipe NPN dengan  $\beta = 100$ ,  $X_E = 0,4 \mu\text{m}$ ,  $X_B = 0,6 \mu\text{m}$

### Abstract

**The Study on Microfabrication MEMS Devices Bipolar Transistors NPN.** The Transistor is electronics device that used in many areas of electronics especially in integrated circuit technology. It has three main terminals: emitter, collector and base and there are creating two p-n junction areas. The transistor operates by current that flows in base and it will control a current in collector and emitter. The bipolar junction transistor has main advantages such as has fast respond for switching rate and able to make a high current to flow. In this paper describes the design and simulations using Sentaurus Synopsys for NPN-bipolar junction transistor that has several parameters:  $\beta = 100$ ,  $X_E = 0.4 \mu\text{m}$ ,  $X_B = 0.6 \mu\text{m}$ .

*Keywords: base, emitter, kolektor, p-n junction, transistor bipolar*

---

### 1. Pendahuluan

Proses Microfabrication digunakan untuk memproduksi *devices* dengan dimensi yang berukuran mikrometer sampai dengan milimeter. Proses ini dapat diimplementasikan secara efektif untuk menghasilkan satu *devices* atau ribuan *devices* yang *uniform*. Proses fabrikasi *integrated circuit* (IC) merupakan proses *microfabrication* yang memegang peranan penting dan dapat digunakan atau kompatibel untuk proses *microfabrication* divais transistor. Beberapa tahun silam, teknologi *microfabrication* telah menjadi sebuah teknologi yang menjanjikan untuk miniaturisasi dan integrasi untuk sistem *chemical* atau biosensor. Komersialisasi untuk teknologi biosensor telah banyak dilakukan dalam beberapa tahun belakangan ini, terlebih lagi dengan didukung oleh teknologi nano

(*nanotechnology*) dan *micromechanical engineered systems* atau *microelectromechanical* (MEMS) memungkinkan untuk *improvement* dalam hal *stability*, *sensitivity* serta kualitas dari divais. Kebutuhan akan sistem MEMS untuk aplikasi lingkungan, kesehatan dan industri semakin meningkat diseluruh dunia. Pembuatan sistem mikrosensor, terintegrasi dan *portable* sangat dibutuhkan untuk kemudahan pengoperasian di lapangan. Manfaat dari sistem divais yang miniatur (mikro), terintegrasi dan *portable* adalah peningkatan efisiensi, kecepatan, perbaikan *reliability* dari proses analisis, dan mengurangi konsumsi pemakaian *sample* dan *reagent*. Dengan kemajuan teknologi mikroelektronika dan MEMS teknologi hal ini bisa dilakukan dengan cara fabrikasi beberapa elektroda pada suatu keping silikon atau substrate. Dalam bidang sensor *electrochemical* dan *actuator* pada saat ini miniaturisasi

dan integrasi komponen-komponen suatu sistem devais sedang dikembangkan di laboratorium-laboratorium yang menuju ke suatu sistem baru, di mana semua komponen terintegrasi secara total yang dikenal dengan nama *micro total analysis system*. Teknologi proses yang banyak digunakan untuk pembuatan mikro-devices adalah *silicon-based microfabrication* yang dapat menghasilkan struktur yang berukuran mikrometer dan memungkinkan untuk membuat mikrosensor dalam bentuk *array* atau multi-sensor pada suatu keping *chip*. Di samping itu teknologi *thin/thick film* juga banyak digunakan untuk pembuatan *chemical/biological* sensor, karena prosesnya lebih sederhana dan *low cost* sangat cocok untuk pembuatan *disposable* sensor.

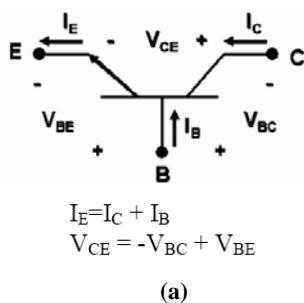
Transistor merupakan salah satu komponen elektronika paling penting dan sangat berperan dalam teknologi rangkaian terintegrasi. Terdapat dua jenis transistor berdasarkan jenis muatan penghantar listriknya yaitu bipolar dan unipolar. Pada transistor bipolar, jenis muatan penghantar listriknya adalah melalui pergerakan elektron dan *hole* sedangkan pada transistor unipolar, jenis penghantar listriknya adalah elektron. Sesuai dengan susunan bahan yang digunakan, transistor bipolar terdiri dari dua tipe yaitu NPN dan PNP [1-2]. Simbol hubungan antara arus dan tegangan dalam transistor untuk masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2.

Terdapat stutu hubungan matematis antara besarnya arus *colector* ( $I_C$ ), arus basis ( $I_B$ ) dan arus emiter ( $I_E$ ) yaitu beta ( $\beta$ ), di mana beta merupakan besar penguatan arus DC untuk *common emitter* sedangkan alpha ( $\alpha$ ) merupakan besar penguatan arus untuk *common basis*. Hubungan matematis dapat ditunjukkan dengan persamaan,

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \tag{2}$$

Dari persamaan (1) dan (2) maka akan diperoleh hubungan matematis antara  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah,



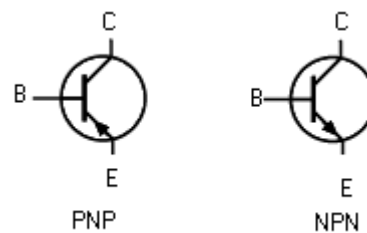
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \tag{3}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \tag{4}$$

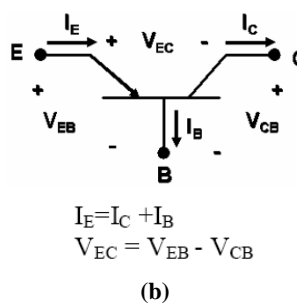
Daerah emiter memiliki konsentrasi doping yang tinggi untuk menghasilkan sumber *carrier* yang cukup, elektron untuk NPN, dan *hole* untuk PNP. Disebut transistor bipolar karena arus listrik yang terbentuk dihasilkan oleh kedua *carrier* tersebut. Karena kedua sambungan EB dan CB dapat dibias secara maju atau mundur, maka terdapat 4 mode operasi pada BJT, yaitu *active*, *reverse-active*, *cut-off*, dan saturasi.

Dianggap transistor pada kondisi *active forward bias mode*. Saat keadaan ini sambungan *base-emitter* diberikan bias maju sedangkan sambungan *base-colector* pada bias mundur. Elektron datang dari emiter masuk ke basis dan *hole* datang dari basis masuk ke emiter. Elektron dapat mengalir sebagai pembawa muatan minoritas melalui daerah *quasi-neutral* pada basis. Pada saat elektron sampai di daerah deplesi basis-kolektor, elektron tersebut akan mengalir pada daerah tersebut karena adanya medan listrik. Aliran elektron ini dinamakan arus difusi, yang merupakan bagian utama dari arus kolektor.[3,5]

$$\phi_{BI} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \tag{5}$$



Gambar 1. Simbol untuk Transistor Bipolar



Gambar 2. (a) Simbol Hubungan Arus dan Tegangan untuk Tipe NPN; (b) Simbol Hubungan Arus dan Tegangan untuk Tipe PNP [2-5]

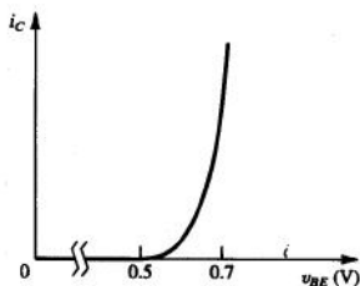
Teknologi bipolar merupakan teknologi fabrikasi yang pertama kali dikembangkan untuk membuat transistor NPN oleh Bardeen, Brattain dan Shockley di *Bell Laboratories* tahun 1948 [6]. *Bipolar* berarti dua kutub, transistor bekerja karena adanya dua muatan (kutub), yaitu muatan negatif (elektron) dan muatan positif (*hole*) yang dapat mengalirkan arus. Sedangkan disebut *junction* karena terdapat 2 buah *p-n junction* yang tersambung *back-to-back*. Transistor bipolar merupakan devais elektronik yang terdiri atas tiga terminal, emitor, kolektor, dan basis, yang membentuk dua buah *p-n junction*. Prinsip dasar kerja transistor bipolar adalah arus yang mengalir pada basis akan mengendalikan arus pada kolektor dan emiter[3,7].

Terdapat dua jenis transistor dilihat dari muatan pembawa mayoritas pada transistor tersebut, yaitu transistor jenis NPN dan transistor jenis PNP. Pada transistor NPN, elektron bertindak sebagai pembawa muatan mayoritas dan *hole* sebagai pembawa muatan minoritas. Sedangkan pada transistor PNP pembawa muatan adalah *hole* dan pembawa muatan minoritas adalah elektron. Pada transistor NPN, lapisan basis memiliki tipe N berada di antara lapisan tipe P, dan pada transistor PNP memiliki struktur sebaliknya [1].

Keunggulan utama dari transistor dengan teknologi bipolar adalah kecepatan *switching*-nya yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi MOS serta kemampuannya untuk dapat mengalirkan arus yang tinggi. Sedangkan kekurangannya adalah dari segi kerapatan rangkaian yang dibuat rendah serta konsumsi daya yang diperlukannya lebih besar dibandingkan dengan transistor MOS[2,4,5].

**Tabel 1. Mode Operasi Transistor Bipolar[1-2]**

<i>Operating Mode</i>	<i>Emitter-Base junction</i>	<i>Collector-Base junction</i>
<i>Active</i>	<i>forward biased</i>	<i>reverse biased</i>
<i>Cut-off</i>	<i>reverse biased</i>	<i>reverse biased</i>
<i>Saturation</i>	<i>forward biased</i>	<i>forward biased</i>
<i>Reverse active</i>	<i>reverse biased</i>	<i>forward biased</i>



**Gambar 3. Tegangan Built-in Transistor Bipolar [1-2]**

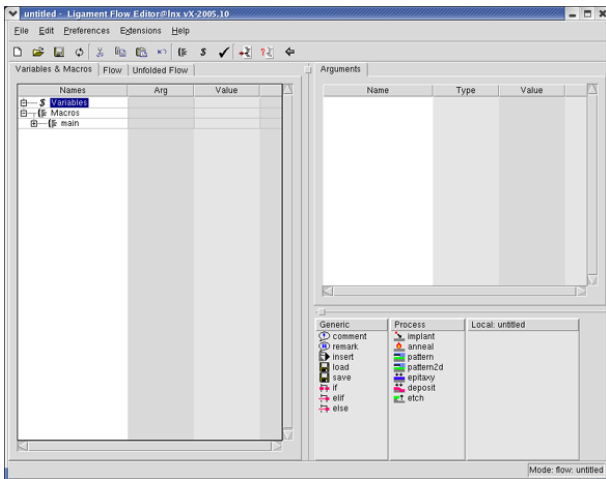
Sensor temperature dengan menggunakan teknologi transistor bipolar dapat menghasilkan sensitifitas 10-20 mV/°C. Pada aplikasi rangkaian analog, IC (*integrated circuit*) bipolar masih memiliki pasar yang belum tergeser oleh IC MOS, seperti pada rangkaian Op-Amp (*operation amplifier*) [5,9-11].

Dalam tulisan ini dijelaskan proses desain dan simulasi proses fabrikasi transistor bipolar tipe NPN dengan  $\beta = 100$ ,  $X_E = 0.4 \mu\text{m}$ ,  $X_B = 0.6 \mu\text{m}$ , menggunakan program simulasi Sentaurus Synopsys. Diharapkan melalui hasil simulasi tersebut dapat memberikan acuan dalam proses pembuatan devais yang sesungguhnya.

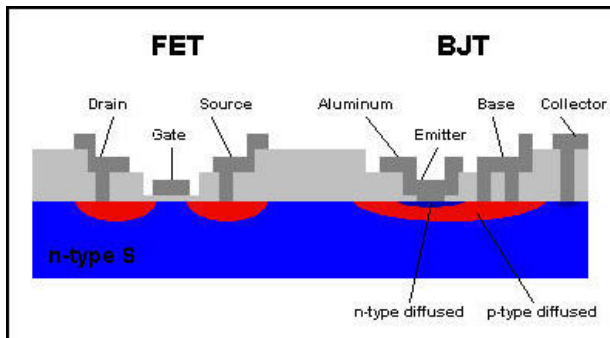
## 2. Metode Penelitian

Sentaurus Synopsys merupakan program tools untuk desain dan simulasi proses fabrikasi devais dan VLSI keluaran dari Synopsys. Dalam tulisan ini digunakan salah satu program dari Sentaurus Synopsys untuk desain simulasi proses fabrikasi devais yaitu DIOS, Ligament dan Tecplot SV serta simulasi karakteristik devais yaitu Davinci [7,12]. DIOS merupakan program simulator proses multidimensi dari Synopsys, di mana mensimulasikan setiap langkah proses fabrikasi layaknya proses di laboratorium seperti etsa, deposisi, ion implantation, dan difusi serta oksidasi dengan model yang identik dalam satu atau dua dimensi. Beberapa kapabilitas yang dimiliki DIOS adalah mampu melakukan simulasi proses secara tiga dimensi (3D). DIOS juga merupakan program TCAD dengan *full* otomatis *meshing* melalui *grids* yang sangat adaptif tanpa bantuan dari luar. DIOS dapat dijalankan dengan mode interaktif atau melalui *input command file*. Program simulasi DIOS dapat dijalankan secara interaktif. Seluruh alur proses dapat disimulasikan dengan memberikan *input command* baris per baris sebagai input standar. Program simulasi yang akan kita jalankan di DIOS sebaiknya dituliskan kedalam sebuah file yang menggambarkan keseluruhan proses fabrikasi sebuah komponen semikonduktor. Untuk itu sangat dibutuhkan program *text editor* seperti *notepad*, *gedit* (*Linux version*) sebagai program bantuan untuk menuliskan program alir proses. Ligament adalah program *generic interface* untuk TCAD *process simulation*, melalui program ini dapat dilakukan desain simulasi aliran proses untuk TCAD secara *user friendly* karena didukung oleh *graphical user interface* (GUI). Input (masukan) untuk Ligament dapat berupa aliran proses, *process libraries*, *layouts* dan informasi lain yang berhubungan dengan TCAD. Sedangkan keluaran dari Ligament adalah *command files* yang akan digunakan dalam simulasi proses seperti DIOS. Program Ligament ini terdiri dari tiga *tools* utama yaitu: Ligament *flow editor*, Ligament *layout editor* dan Ligament *translator*. Ligament *flow editor* menyediakan *convenient graphical user interface* untuk mendesain dan mengedit aliran proses. Hal ini memungkinkan bagi

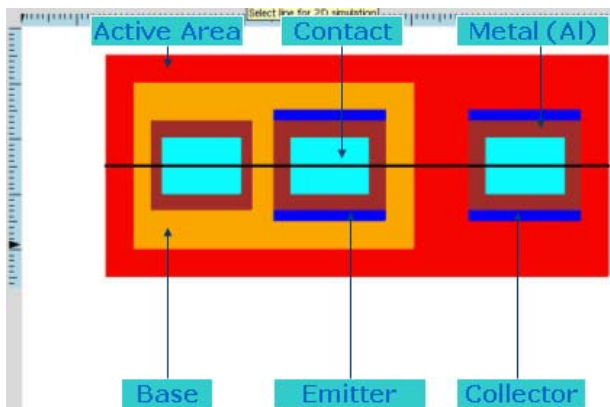
user untuk menyusun aliran proses dari makro termasuk *local macros* yang didefinisikan oleh *user* maupun *global macros* yang telah tersedia pada *Ligament tool library*. *Ligament layout editor* juga menyediakan *graphical user interface*.



Gambar 4. *Graphical User Interface* dari *Ligament Flow Editor*[12]



Gambar 5. Desain Penampang *Crosssectional* Transistor Bipolar Tipe NPN



Gambar 6. Desain Tata Letak Masker Transistor

Untuk mendesain dan mengedit *layout*. Kegunaan utama dari *Ligament layout editor* ini adalah sebagai *interface* antara *EDA layout tools* dan *TCAD* seperti menentukan domain simulasi 1D, 2D, atau 3D. *Ligament translator* digunakan sebagai penterjemah (*translator*) dari bahasa yang biasa digunakan ke dalam bahasa *SPR (simple process representation)* yang digunakan oleh *Ligament tools* dan juga dikenali oleh program simulator seperti *DIOS*, *Sentaurus Process*, *TSUPREM-4*.

### 3. Hasil dan Pembahasan

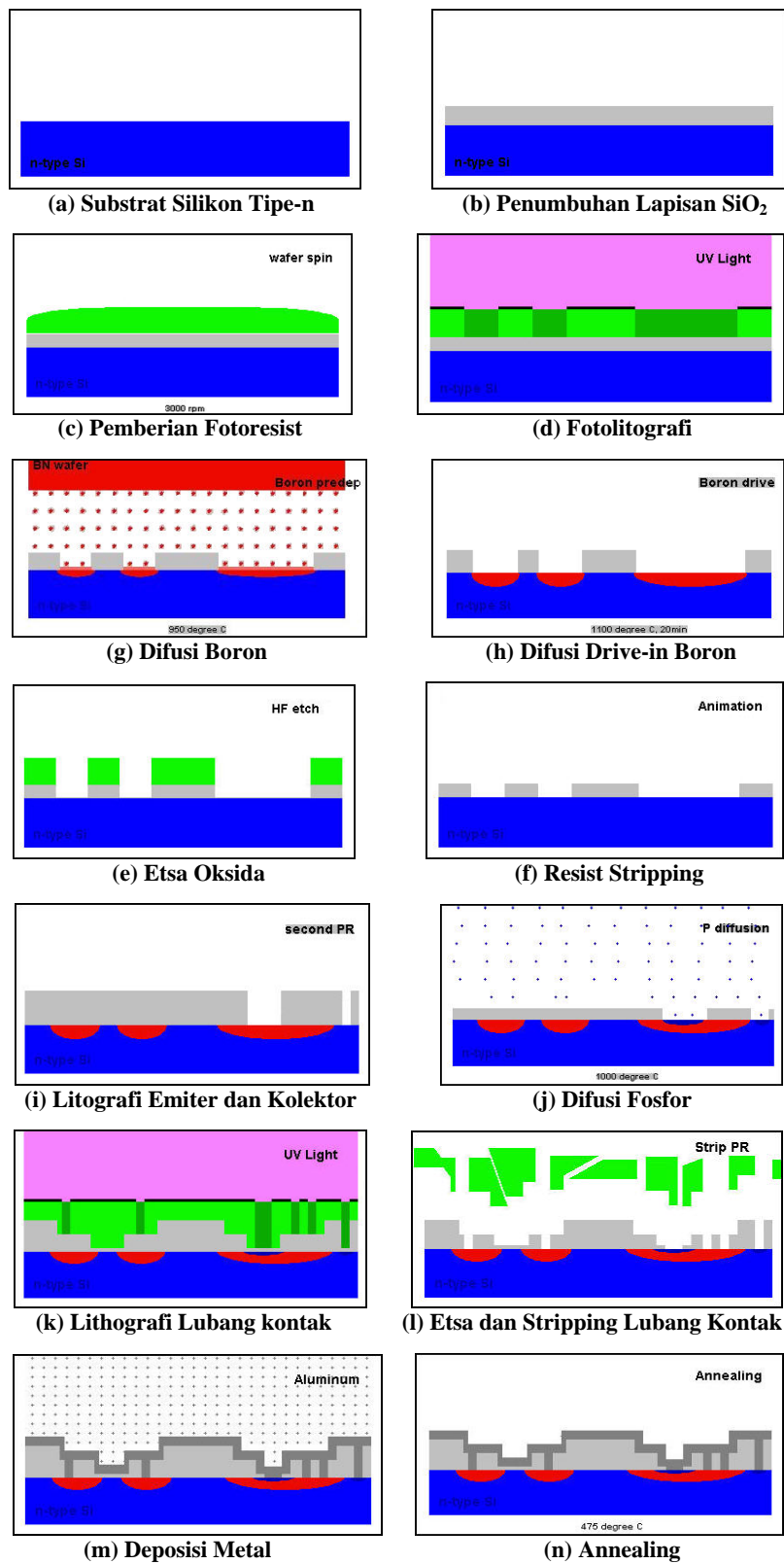
**Tahapan proses desain tata letak.** Dalam proses desain dan simulasi fabrikasi transistor bipolar tipe NPN, diawali dengan proses desain tata letak dari transistor bipolar yang akan dibuat. Gambar 5 merupakan gambar penampang *cross-sectional* dari transistor bipolar tipe NPN yang akan dibuat.

Dari penampang *crosssectional* dari transistor bipolar tipe NPN inilah yang menjadi acuan untuk pembuatan tata letak masker yang akan digunakan dalam proses fabrikasi [2]. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa tools *software* yang digunakan untuk desain masker ini menggunakan *Ligament layout editor*. Gambar 6 merupakan hasil desain masker untuk transistor bipolar.

**Proses fabrikasi transistor.** Step proses fabrikasi untuk pembuatan transistor bipolar adalah mengacu pada Gambar 7 dengan uraian proses sebagai berikut:

Substrat yang digunakan (a) adalah silikon tipe-n karena akan dibentuk lapisan substrat tipe-n, tipe-p, dan tipe-n sebagai representasi ketiga elektroda transistor, yaitu emiter, basis, dan kolektor [4]. Langkah selanjutnya adalah menumbuhkan lapisan oksida ( $\text{SiO}_2$ ) di atas silikon; (b) proses penumbuhan ini disebut dengan oksidasi termal, karena menggunakan suhu tinggi, sekitar  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ . Proses selanjutnya adalah pembentukan daerah basis (tipe-p). Proses pertama yang dilakukan adalah memindahkan pola masker daerah basis pada substrat melalui fotolitografi. Proses litografi ini sendiri terdiri dari beberapa proses utama, antara lain pemberian *resist* yang peka cahaya; (c) *pre-bake* untuk menguatkan *resist*, penyinaran sinar ultra violet pada masker; (d) *developing* dan *post bake*, etsa oksida yang tidak diinginkan; (e) untuk membuka daerah basis, dan penghilangan *resist/stripping*; (f) proses kedua adalah difusi boron untuk membentuk daerah basis (tipe-p). Proses difusi ini terdiri dari dua bagian, yaitu *pre-deposisi* (g) dan *drive-in* (h).

Proses selanjutnya adalah pembentukan daerah tipe-n untuk emiter dan kolektor [4,6]. Seperti pada proses sebelumnya, penumbuhan oksida, fotolitografi, dan



Gambar 7. Tahapan Proses Fabrikasi Transistor Bipolar

difusi adalah 3 proses utama yang dilakukan. Pada tahapan ini, pola yang digunakan adalah pola untuk emiter dan kolektor (i). Pada proses difusi, digunakan

material fosfor untuk membentuk daerah tipe-n pada substrat. Setelah daerah untuk basis, emiter, dan kolektor terbentuk, maka proses selanjutnya adalah

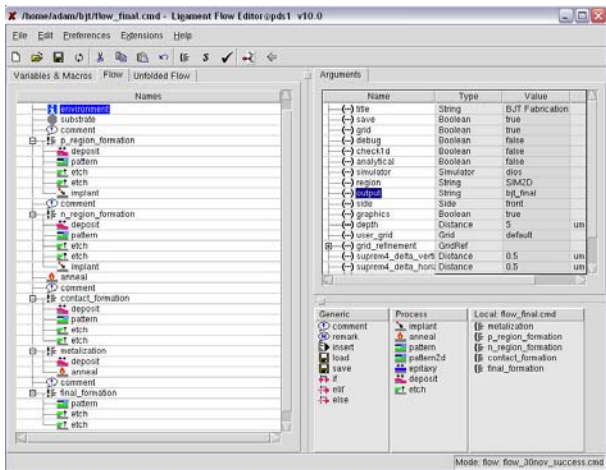
pembuatan lubang kontak untuk metal interkoneksi (k) dan (l). Pola yang digunakan adalah pola lubang kontak dan menggunakan urutan proses yang sama, yaitu penumbuhan oksida, fotolitografi, etsa oksida, dan *resist stripping*. Setelah lubang kontak terbentuk, proses selanjutnya adalah deposisi metal sebagai interkoneksi devais dengan komponen lainnya. Material yang akan dideposisikan adalah Aluminium (m). Setelah deposisi, perlu ditambah satu proses lagi yaitu Annealing (n). Proses ini berfungsi untuk memperbaiki kontak antara metal dengan substrat. Proses annealing ini berupa pemanasan devais dengan suhu dan waktu tertentu.

Proses terakhir adalah penghilangan metal pada daerah yang tidak perlu dideposisi metal. Dengan proses yang sama dengan sebelumnya, daerah metal yang tidak perlu akan dihilangkan (o) sehingga hanya daerah yang akan terhubung dengan komponen lain saja yang tertutup oleh metal, yaitu pada ketiga elektroda transistor. Proses fabrikasi transistor bipolar telah selesai (p). Dapat dilihat pada (p), bahwa terdapat daerah yang disebut emiter, basis dan kolektor [5]

Dari tahapan proses fabrikasi transistor bipolar tersebut, maka dituliskan kembali tahapan proses tersebut ke dalam *step* proses fabrikasi pada Ligament *flow* editor, seperti yang terlihat pada Gambar 8.

Dari hasil penulisan kembali step fabrikasi transistor bipolar pada Ligament *layout* editor ini akan di terjemahkan ke dalam *command line* yang dikenali oleh *software* DIOS yang selanjutnya akan melakukan proses simulasi fabrikasi transistor bipolar disertai dengan spesifikasi hasil fabrikasi dari transistor bipolar tersebut.

**Spesifikasi desain transistor.** Spesifikasi parameter-parameter desain dari transistor yang akan dibuat adalah sebagai berikut:  $\beta = 100$ ;  $XE = 0.4 \mu\text{m}$ ; konsentrasi emiter =  $2e19 /\text{cm}^3$ ; konsentrasi *base* =  $2e17/\text{cm}^3$ ; konsentrasi substrat =  $2e15 /\text{cm}^3$ ;  $XB = 0.6 \mu\text{m}$ .

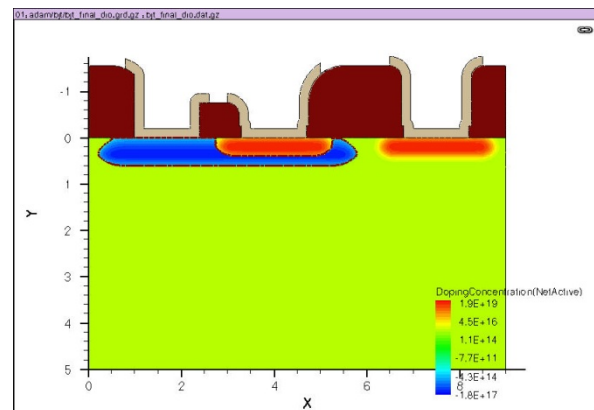


Gambar 8. Tahapan Fabrikasi Transistor Bipolar pada Ligament *Layout* Editor

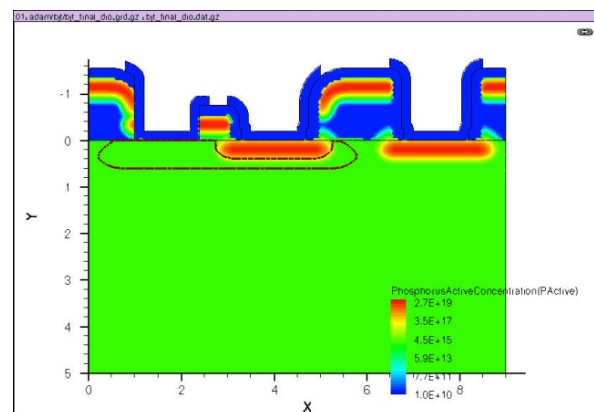
Sedangkan parameter desain proses pembuatan transistor bipolar tersebut adalah sebagai berikut: Substrat silikon tipe-n konsentrasi =  $2e15 /\text{cm}^3$ , tebal oksida =  $0,8 \mu\text{m}$  dan  $0,25 \mu\text{m}$ ; *implant* boron (p)  $\Rightarrow x=0,6 \mu\text{m}$ ; *energy* =  $100 \text{ keV} \Rightarrow R_p = 0,31 \mu\text{m}$ ;  $\sigma = 0,07 \mu\text{m}$ ; *dose* =  $3.5e12/\text{cm}^2$ ; *energy loss* =  $30 \text{ eV/nm}$ ; ( $7,5 \text{ eV/lattice} < 15 \text{ eV}$ ); *implant fosfor* (n+)  $x = 0,4 \mu\text{m}$ ; *energy* =  $150 \text{ keV} \Rightarrow R_p = 0,2 \mu\text{m}$ ,  $\sigma = 0,06 \mu\text{m}$ ; *dose* =  $3e14/\text{cm}^2$ ; *energy loss* =  $340 \text{ eV/nm}$  ( $85 \text{ eV/lattice} > 15 \text{ eV}$ ); *need annealing*  $830 \text{ C}$ ,  $30 \text{ min}$ . Metalisasi: Deposisi Aluminium  $0.2 \mu\text{m}$ ; *Annealing*  $450 \text{ C}$ ,  $15 \text{ min}$ .

Setelah tahapan proses fabrikasi diterjemahkan ke dalam format *command line* dari DIOS, maka tahapan proses tersebut dijalankan dan disimulasikan secara *software* yang memperlihatkan proses fabrikasi transistor bipolar seolah-olah layaknya seperti proses sesungguhnya yang di lakukan di *clean-room*. Setelah simulasi selesai dilakukan, maka diperoleh hasil simulasi berupa divais transistor bipolar seperti terlihat pada Gambar 9.

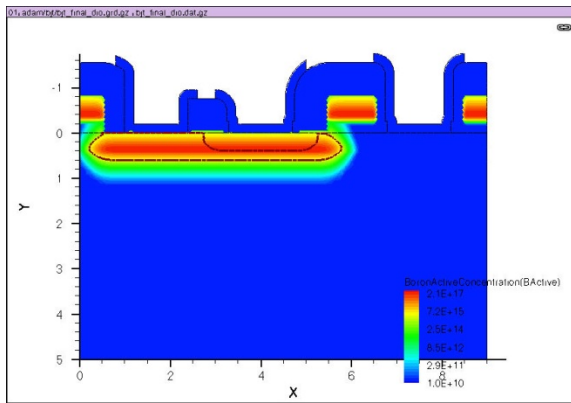
Dari hasil simulasi di atas terlihat struktur divais dari transistor bipolar yang dibuat, termasuk konsentrasi doping yang diperoleh sebagai akibat hasil proses fabrikasi transistor bipolar tersebut. Sedangkan hasil



Gambar 9. Hasil Simulasi Transistor Bipolar



Gambar 10. Konsentrasi Fosfor pada Transistor Bipolar



Gambar 11. Konsentrasi Boron pada Transistor Bipolar

simulasi yang memperlihatkan besar konsentrasi doping fosfor dan boron terlihat pada Gambar 10 dan 11.

Dari hasil simulasi di atas, maka diperoleh hasil fabrikasi untuk transistor bipolar sebagai berikut: Konsentrasi substrat =  $4,5e15/cm^3$ ; Konsentrasi basis =  $2,1e17/cm^3$ ; Konsentrasi emiter =  $2,7e19/cm^3$ ; *Junction* emiter =  $0,4 \mu m$ ; *Junction* basis =  $0,6 \mu m$ ; lebar kontak emiter =  $1,5 \mu m$ ; tebal oksida =  $0,25 \mu m$ .

#### 4. Simpulan

Dari hasil simulasi proses fabrikasi transistor bipolar di atas dapat diambil simpulan sebagai berikut: 1) Parameter-parameter desain awal MEMS untuk transistor bipolar sesuai dengan hasil yang diperoleh melalui simulasi DIOS, 2) Proses simulasi fabrikasi transistor bipolar menggunakan program Sentaurus Synopsys telah berhasil dilakukan, 3) Hasil simulasi proses fabrikasi transistor bipolar tipe NPN ini dapat digunakan sebagai acuan untuk proses fabrikasi divais tersebut yang sesungguhnya di *clean-room*.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada kepada UP2M-PNJ yang membiayai penelitian sehingga dapat selesai tepat waktu.

#### Daftar Acuan

- [1] G.S. May, S.M. Sze, Fundamental of Semiconductor Fabrication, John Wiley and Son, Inc., New York, 2004, p.305.
- [2] W.R. Runyan, K.E. Bean, Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology, Addison-Wesley, Boston, 1990, p. 683.
- [3] J.S. Blakemore, Solid state Physics, 2<sup>nd</sup> sd., Cambridge University Press, Cambridge, 1995, p.176.
- [4] P.R. Grey, R.G. Meyer, Analysis and Design of Analog Integrated Circuits, 2<sup>nd</sup> ed. Wiley, New York, 1984, p.392.
- [5] H. Kroemur, Heterojunction Bipolar Transistors and Integrated Circuits, Proc. IEEE, 70 (1982) 13.
- [6] R.L. Cadenhed, D.T. DeCoursey, The History of Microelectronics Part 1, International Jurnal For Hybrid Microelectronics, 8/3 (1985) 14-30.
- [7] Anon., Semiconductor Applet from Buffalo University, <http://jas.eng.buffalo.edu>, 2010.
- [8] B.J. Baliga, Modern Power Devices, Wiley, New York, 1987, p.476.
- [9] C.F. Dunn, F.R. Brotzen, J.W. Mcpherson, J. Electronic Materials 15/5 (1986) 273.
- [10] H. Baltes, O. Brand, Sensor and Actuators A, 92 (2001) 1.
- [11] N. Kerness, A. Koll, A. Schaufelbuhl, C. Hagleitner, H. Baltes, Proc. IEEE MEMS, Miyazaki, Japan, 2000, p.96.
- [12] TCAD Sentaurus, Reference Material, Synopsys 2006, <http://www.synopsys.com/tools/tcad/Pages/default.aspx>, 2006.