

KEUNGGULAN POWER MOSFET DAN IGBT SEBAGAI PIRANTI ELEKTRONIKA DI BIDANG ELEKTRONIKA DAYA

Sarita Yuniarti Hanum, Wiwien Hadikurniawati
Dosen Fakultas Teknik Universitas Stikubank Semarang

DINAMIKA
TEKNIK
Vol. II, No. 1
Januari 2008
80 - 90

Abstract

Switching device is truly dominated by transistor, also by SCR that is hard to be off and relatively work slowly. This condition push the designers in every laboratories making of semi conductor device as in Motorola, IR, APT, IXYS, Siemens, Samsung and others that compete for finding switching device that have better capabilities. As the result, in marketing, now appear power switching device MOSFET and IGBT that compete each other.

Keyword : semiconductor, mosfet, fet, dmos

A. PENDAHULUAN

Para rekayasawan yang berkecimpung di bidang elektronika daya pun kini dihadapkan pada suatu pilihan yang perlu lebih cermat dalam mempertimbangkan beberapa kriteria, saat harus memilih mana dari kedua piranti elektronik tersebut yang akan dipakai.

MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) maupun IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), keduanya merupakan piranti atau komponen aktif pokok yang kini banyak digunakan dalam bidang Elektronika Daya; yakni UPS (*Uninterruptible Power Supply*), dan sistem pengendali daya/motor-motor besar di bidang industri.

Sebelum adanya kemajuan kinerja Power MOSFET, gelanggang penyakelar daya dulunya memang didominasi oleh BJT (*bipolar junction transistor*), dan SCR yang sulit untuk dimatikan (*turn-off*) dan lambat. Para perancang di berbagai laboratorium pembuatan piranti semikonduktor selalu berusaha menemukan piranti penyakelar (*switching device*) yang memiliki kemampuan lebih baik. Beberapa waktu kemudian, barulah dikembangkan MOSFET, dan berikutnya IGBT.

Sebenarnya, pasar pun pernah ditawari MCT (*MOS-Controlled Thyristor*), yang saat itu merupakan semikonduktor yang memiliki kinerja terbaik untuk daya tinggi dan tegangan tinggi, tetapi kenyataannya tak pernah menjadi populer. Kini pabrik-pabrik semikonduktor terus mengembangkan kedua piranti tersebut di atas menuju peningkatan dalam hal mempertinggi tegangan dadal (*breakdown voltage*), memperbesar kemampuan arusnya, dan memperkecil rugi penyakelaran atau peralihannya.

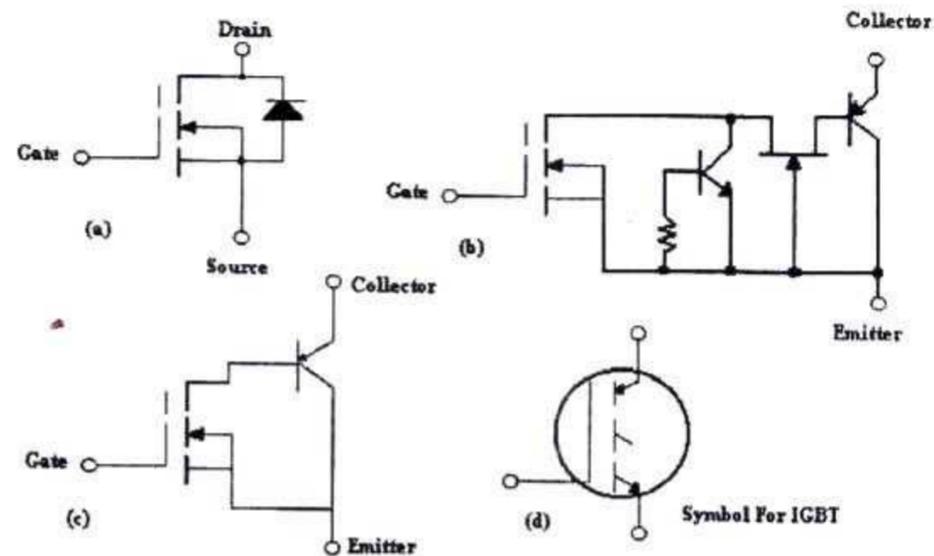
IGBT memang telah muncul sebagai pesaing bagi Power MOSFET konvensional yang beroperasi pada tegangan tinggi dan rugi konduksi yang rendah. Berbagai usaha telah dilakukan dalam tahun-tahun terakhir ini untuk dapat membuat penyakelar IGBT dapat bekerja seperti halnya MOSFET, sembari mendapatkan kemampuan yang setara dengan transistor daya bipolar, baik yang bekerja pada tegangan menengah maupun tegangan tinggi. Para pembuat IGBT memang sedang berusaha untuk membuat piranti elektronik ini menjadi pilihan alternatif yang menarik untuk rentang yang luas di bidang elektronika daya, tempat yang semula didominasi oleh power MOSFET dan transistor bipolar.

B. PEMBAHASAN

Dalam pembuatannya, MOSFET dan IGBT menempuh langkah-langkah pemrosesan yang identik, namun masing-masing menempuh langkah yang berbeda dalam hal polaritas substratnya. Perbedaan langkah ini menghasilkan struktur MOSFET dan IGBT seperti dinyatakan pada *Gambar 1a dan 1b*. Untuk IGBT, strukturnya lebih kompleks, karena terdiri dari; sebuah MOSFET kanal -N, sebuah transistor NPN, dan sebuah FET junction yang mengemudikan transistor keluaran PNP. Label 'kolektor' dan 'emitor' dalam gambar 1b dan 1c tersebut tampaknya memang menjadi rancu atau membingungkan, namun yang ditunjukkan itu sebenarnya adalah kolektor dan emitor transistor npn pada lambangnya.

Transistor bipolar PNP dan NPN dalam gambar 1 membentuk sebuah SCR. Jika penguatan dari keduanya tersebut cukup tinggi, maka SCR akan dapat terkunci. Resistansi basis R berfungsi mencegah pengguliran dari kondisi saat menyambung (on). Secara prinsip, rangkaiannya dapat disetarakan dan direduksi

sehingga menjadi seperti terlihat pada Gambar 1c. Struktur yang demikian ini dapat menawarkan yang terbaik dari dua kubu, yakni; impedansi masukan yang tinggi, yang merupakan ciri dari sebuah power MOSFET, dan tegangan saturasi yang rendah, yang merupakan ciri dari sebuah transistor bipolar.



Gambar 1. Susunan dasar dan simbol : (a) Power MOSFET, (b) IGBT, (c) reduksi gambar b, simbol IGBT

1. Perbandingan Umum Antara Kinerja MOSFET dan IGBT

Perbandingan kinerja penyakelaran MOSFET dan IGBT secara singkat dinyatakan dalam Tabel 1. Untuk tujuan komparasi, Tabel 1 tersebut juga menyertakan pula perbandingannya dengan transistor bipolar.

Tabel 1. Perbandingan tiga piranti penyakelar daya untuk kemampuan (rating) yang setara

Karakteristik	MOSFET	IGBT	Bipolar
Kemampuan arus (A)	20	20	20
Kemampuan tegangan (V)	500	600	500
R_{on} (ohm) Pada 25° C	0,2	0,24	0,18
R_{on} (ohm) Pada 150° C	0,6	0,23	0,24
Waktu turun (nanodetik)	40	200	200

Besaran tegangan kolektor-emitor dalam kondisi menyambung atau jenuh (V_{CEsat}) yang biasa digunakan untuk menggambarkan karakter suatu IGBT, dalam Tabel 1 tersebut ditranslasikan ke dalam besaran resistansi kolektor-emitor dalam kondisi menyambung (R_{on}).

Dua fakta yang bersumber pada Tabel 1 tersebut adalah bahwa; pertama, transistor bipolar sangat lebih lambat daripada MOSFET. Secara prinsip, hal ini disebabkan oleh waktu gulir mati (*turn-off*) piranti bipolar yang lebih panjang. Kedua adalah resistansi saat kondisi menyambung (*on-state*) piranti bipolar yang relatif tak bergantung (bersifat invarian) terhadap temperatur, dibandingkan dengan adanya nilai koefisien temperatur yang tinggi pada MOSFET. Informasi koefisien temperatur ini merupakan pertimbangan penting dalam perencanaan batas aman thermal pada sistem-sistem yang berdaya tinggi.

Tabel 2 menyatakan perbandingan yang lebih umum mengenai karakteristik penyakelarnya. Disebabkan oleh struktur masukan gate-nya, MOSFET dan IGBT merupakan piranti elektronik yang dikemudikan oleh tegangan, dengan kebutuhan akan daya pengemudi yang relatif kecil saja. Sementara itu, pada transistor bipolar yang sifatnya dikemudikan oleh arus (arus keluaran dibagi oleh h_{FE}), ia memerlukan pengemudi dengan daya yang relatif lebih besar.

Untuk mempertahankan nilai resistansi yang tetap rendah, pembuat IGBT membuat kemampuan arus yang lebih rendah untuk tipe yang lebih cepat. Sebagai contoh, Perusahaan *International Rectifier* (IR) di pasaran menawarkan tiga tipe IGBT; yakni tipe standar, cepat dan ultra cepat. IR mendeskripsikan kemampuan arus dengan perbandingan terbalik terhadap kecepatan penyakelarnya. Sementara itu V_{CE} saturasinya naik berturut-turut untuk masing-masing tipe tersebut menjadi; 1,3 1,5, dan 1,9 volt.

Parameter terakhir dalam Tabel 2 tersebut adalah rugi penyakelaran (*switching losses*), yang mencerminkan kecepatan penyakelaran dari ketiga piranti elektronik tersebut. Untuk MOSFET, baik transisi saat menyambung (*turn-on*) dan memutus (*turn-off*) sangat cepat. Sedang untuk IGBT, kita dihadapkan pada kenyataan bahwa ada perimbangan dalam hal kecepatan penyakelaran versus kemampuan arus; jenis yang lebih cepat akan mengalami rugi konduksi yang lebih tinggi.

Waktu penyakelaran pada IGBT sebagian besar didominasi oleh waktu saat menyambung, sehingga secara garis besar membatasi penggunaannya dalam sistem yang beroperasi pada laju penyakelaran yang lebih rendah daripada 100 kHz.

Tabel 2 menunjukkan perbandingan IGBT dengan MOSFET dalam hal rugi konduksi yang dinyatakan dalam bentuk tegangan drop (tegangan yang terdapat pada kedua ujung terminalnya saat pirantai tersebut dalam keadaan menyambung) untuk kondisi kemampuan arus pada luasan (area) piranti maupun temperatur yang sama. Pada MOSFET, untuk kemampuan arus yang sama per satuan luasan silikon, resistansi dalam kondisi menyambung naik secara ekponensial terhadap rating tegangannya. Sementara itu, untuk piranti IGBT (yang dinyatakan dalam besaran tegangan kolektor-emitor jenuh ketimbang resistansi dalam kondisi menyambung) lebih mampu mempertahankan rugi konduksi yang rendah untuk semua rating tegangan

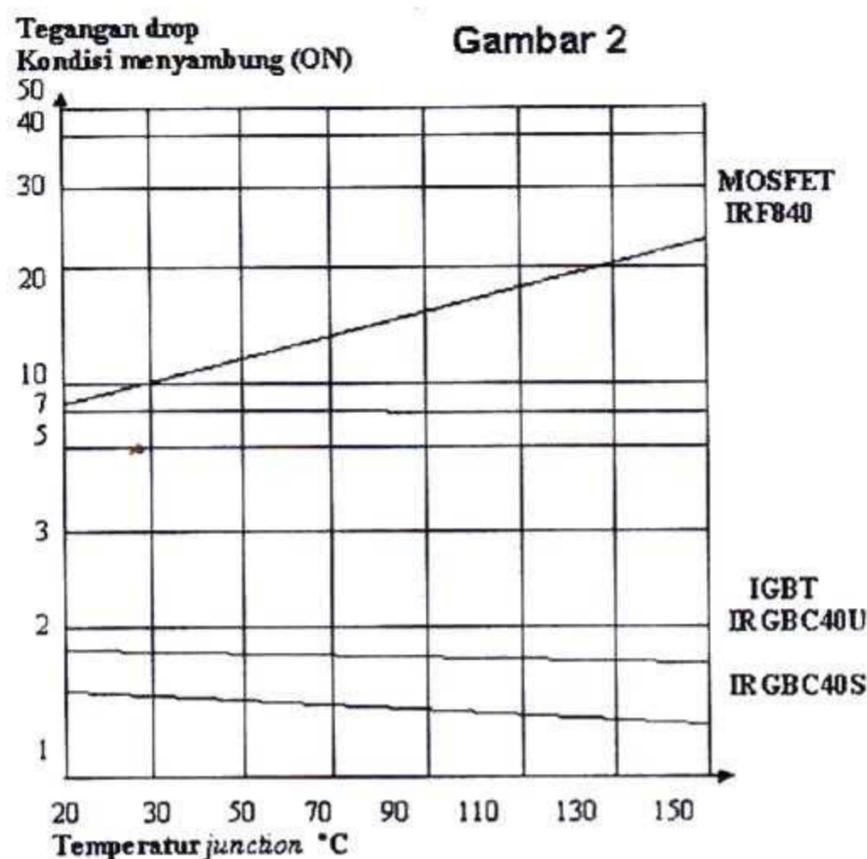
Tabel 2. Perbandingan tegangan drop dan rating tegangan antara IGBT dan MOSFET pada kemampuan arus maupun luasan yang sama

Rating tegangan (Volt)	IGBT	100	300	600	1200
	MOSFET	100	250	500	1000
Tegangan drop untuk 1,7 ampere per mm ² pada temperatur 100° C (Volt)	IGBT	1,5	2,1	2,4	3,1
	MOSFET	2,0	11,2	26,7	100

Perbandingan MOSFET dan IGBT untuk luasan die (irisian tipis bahan semikonduktor yang dipakai untuk membuat transistor atau piranti semikonduktor lainnya) yang sama, secara grafis dinyatakan seperti tampak pada gambar 2.

Pada gambar 2, jelas tampak bahwa IGBT memiliki rugi pada kondisi menyambung lebih rendah. Grafik tersebut menunjukkan tegangan drop dalam kondisi menyambung untuk sebuah MOSFET dan dua IGBT hasil produksi IR untuk arus beban 10 ampere. Piranti yang memiliki rugi yang paling rendah dalam

gambar tersebut adalah IRGBC40S, yakni IGBT tipe standar. Tipe ultra cepatnya; IRGBC40U menawarkan penyakelaran yang lebih cepat, namun rugi dalam kondisi menyambung juga lebih tinggi.



Gambar 2. Perbandingan MOSFET dan IGBT untuk luasan die

2. Piranti Power MOSFET

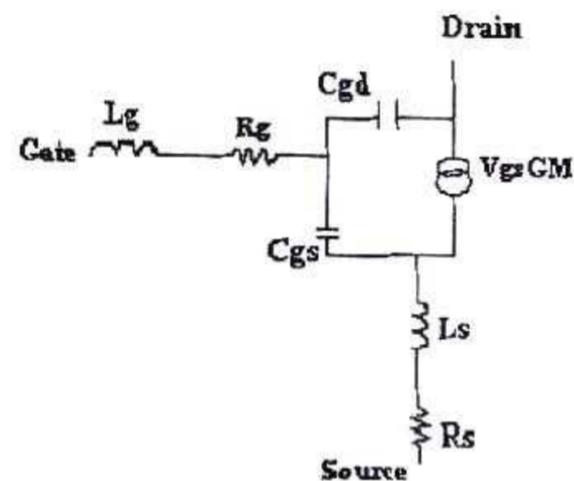
Salah satu cara untuk menaikkan efisiensi adalah mengurangi rugi konduksi dengan mengurangi resistansi dalam kondisi menyambung atau $R_{DS(on)}$. Penyumbang pokok terhadap besarnya nilai resistansi ini pada MOSFET tegangan tinggi adalah dari tiga variabel, yakni resistansi epi, resistansi kanal, dan resistansi JFET. Resistansi epi merupakan reaksi penolakan terhadap penerapan tegangan tinggi, yang berarti merupakan fungsi langsung dari tegangan dadal. Mengurangi kontribusinya hanya dengan menaikkan luasan die FET tidak bisa demikian saja bisa dilakukan, karena adanya faktor-faktor lain yang terkait.

Sebagaimana pada power FET tegangan rendah, resistansi kanal dapat dikurangi dengan menaikkan kepadatan kemasan kanal; yakni dengan menambahkan lebih banyak kanal per unit luasan chip-nya. Namun demikian, sebagaimana halnya pada piranti-piranti tegangan rendah, dengan membuat

penambahan kepadatan kanal, berarti difusi body-p pada die-nya lebih didekatkan satu sama lain, yang berdampak menaikkan resistansi JFET. Jika kepadatan kanal naik, resistansi JFET akan mulai mendominasi, yang menyebabkan sumbangan kenaikan nilai pada resistansi dalam kondisi menyambung.

APT telah berhasil mewujudkan pembuatan FET tegangan tinggi yang disebut Power MOS V (Power MOS seri atau generasi kelima) yang memiliki kemampuan dalam hal pengurangan nilai resistansi kondisi menyambung (yang berarti memperkecil rugi konduksi), dan menaikkan kecepatan (yang berarti memperkecil rugi penyakelaran). Proses ini dilakukan melalui pengurangan resistansi JFET dengan cara mengurangi kedalaman difusi body -p-nya. Sedang pembuatan *junction* yang lebih sempit memungkinkan untuk meningkatkan kepadatan kemasan kanalnya. Di samping proses Power MOS V yang menggunakan teknik "bonding di sepanjang daerah aktifnya", teknologi yang diterapkan ini mampu memperbesar luasan kanal yang dapat dimanfaatkan pada sebuah die.

Analisa model rangkaian dari sebuah power FET menunjukkan bahwa meminimumkan impedansi gate ($R_g + L_g$) dan impedansi source ($R_s + L_s$) mengurangi waktu penyakelaran (Gambar 3).



Gambar 3. Model rangkaian internal sebuah Power FET

Dengan demikian konstanta waktu yang dihasilkan oleh impedansi Gate dikaitkan dengan kapasitansi masukan (C_{gs} dan C_{gd}) menentukan tundaan waktu menyambung ($t_{d(on)}$) dan waktu tunda memutus ($t_{d(off)}$)¹-nya. Di samping itu, impedansi gate yang dikaitkan dengan kapasitansi Miller c_{gd} menciptakan

kontanta waktu yang mengeset waktu menyambung (t_r) dan waktu memutus (t_f). Sementara itu, impedansi source bertindak sebagai umpanbalik negatif pada sinyal gate yang berdampak mengurangi penguatan efektif FET, dan membuat kerjanya lambat karena menaikkan t_r dan t_f -nya.

Struktur sel yang tertutup diberlakukan pada MOSFET yang paling konvensional dengan cara menghubungkan gate dari seluruh sel pada die menggunakan *poly-silicon*. Sifat resistansi tinggi yang dimiliki bahan *poly-silicon* tersebut menghasilkan nilai yang besar untuk R_g . Sebaliknya, struktur Power MOS V tipe *open-cell* pada piranti produksi APT yang melapiskan metal pada *gate poly-silicon* berdampak mengurangi resistansi gate secara signifikan, juga mengurangi waktu penyakelarannya.

Para perancang di IR juga melakukan usaha untuk memacu power FET yang muncul dengan *low-gate-charge* power MOSFET. Seperti APT, mereka menekan nilai resistansi dan induktansi rangkaian gate parasitic eksternal, bersama-sama dengan kapasitansi masukan FET yang cenderung untuk membatasi kecepatan penyakelaran. Parasitic ini dapat menimbulkan guncangan (*ringing*) rangkaian yang berlebihan dan bahkan osilasi terutama ketika melewati daerah operasi linier. Harap diingat bahwa ketika penyakelaran berada di antara kondisi memutus dan menyambung, setiap saklar semikonduktor selalu melalui daerah linier.

3. Piranti IGBT

Kini pasar dunia piranti semikonduktor telah melihat beberapa versi IGBT yang telah diperbaiki untuk aplikasi tertentu. IGBT tradisional memang berbasis pada teknik *punchthrough* yang memiliki rugi-rugi penyakelaran yang tinggi, dan menghasilkan kecepatan yang lebih rendah. Selain itu tegangan kerjanya yang paling tinggi cuma masuk kategori kelas menengah. Kondisi ini akan menjadi lebih buruk jika tegangan dadalnya dinaikkan. Masalahnya adalah waktu hidup elektron-elektron dan hole-hole dalam daerah aliran muatan (*drift*) pada IGBT menyebabkan rugi penyakelaran yang tinggi maupun arus bocor.

Beberapa pabrik telah menerapkan iradiasi elektron dosis tinggi untuk meningkatkan pembunahan waktu hidup pembawa muatan sembari meminimumkan ekor arus dan rugi energi penyakelaran. Sementara, pabrik lain

mengadopsi metode *non-punchthrough* untuk menjangkau kecepatan yang lebih tinggi dan nilai tegangan kolektor-emitor saat menyambung ($V_{CE(sat)}$) yang lebih rendah. Namun demikian efisiensi masih merupakan suatu masalah. Beberapa usaha sedang dilakukan untuk mengurangi rugi penyakelaran pada IGBT *non-punchthrough*.

Iradiasi dosis tinggi sebenarnya menambah biaya karena memerlukan langkah-langkah pemrosesan tertentu. Di samping itu, iradiasi merupakan proses yang tidak bisa dilakukan secara cermat (teliti) yang membahayakan struktur lattice pada piranti yang bersangkutan dan menghasilkan variasi parameter yang lebar. Dan hal ini akan menurunkan karakteristik VCE IGBT.

Beberapa tahun yang lalu, para perancang di Siemens menghadirkan IGBT *non-punchthrough* yang menggunakan teknik pensubstitusian difusi tipe p yang mendalam pada lapisan epitaksi yang tebal. Lapisan epitaksi ini berfungsi agar piranti tahan terhadap tegangan, yang kebanyakan diperuntukkan pada semikonduktor tegangan tinggi. Namun demikian kondisi ini juga menyebabkan munculnya resistansi kondisi menyambung yang signifikan ; dan untuk IGBT, drop tegangan majunya juga akan naik. Lebih jauh lagi, penggunaan lapisan epitaksi akan membuat harga piranti menjadi mahal, kerjanya lambat dan kesulitan untuk mengukur maupun mengendalikan proses pembuatannya secara seragam, karena ia tidak dikontrol dengan teknik litografi.

Baru-baru ini Motorola bergerak ke apa yang mereka sebut "float zone process". Ini merupakan teknologi *non-punchthrough* versi Motorola, dan diterapkan secara ketat untuk IGBT 1200 volt. Teknologi baru ini berhasil menaikkan laju penyakelaran pada piranti-piranti 1200 volt maupun mengurangi biaya fabrikasi.

Kini banyak pabrik semikonduktor mengetahui bahwa IGBT telah mendominasi aplikasi seperti dalam pengendalian motor-motor ac besar, yang derau audio bukan merupakan suatu masalah, sehingga laju penyakelaran dapat menjadi sangat jauh di bawah 20kHz. Namun demikian, mereka juga tahu bahwa pasar untuk switching regulator jenis off-line (bekerja pada frekuensi tinggi) jauh lebih besar daripada yang untuk kendali motor. Oleh sebab itulah IR menempuh dua prosedur yang saling berbeda untuk memperbaiki kinerja penyakelar daya

tegangan tinggi bagi piranti yang diproduksi dalam rangka memenuhi tuntutan pasar.

Untuk piranti yang bekerja pada frekuensi tinggi, IR mengembangkan WARP-speed IGBT, yakni IGBT seri Warp 400 dan 600 volt yang memiliki kecepatan penyakelaran sampai 150kHz pada rating arus dari 5 sampai 50 ampere. Perusahaan lain, IXYS Corp. telah mengklaim kemampuan kecepatan penyakelaran 100 kHz pada IGBT hiperFast 600 volt yang diproduksi. Sementara itu Harris Semiconductor, memunculkan seri penyakelar ultra cepat 600-volt dengan laju di atas 50 kHz. Target tim pengembang di Harris adalah melampaui kecepatan 100 kHz dengan kemampuan arus yang lebih besar, serta rugi konduksi dan rugi penyakelaran yang lebih rendah.

Dalam aktualisasinya, rugi konduksi pada IGBT tipe cepat adalah sedikit lebih besar daripada MOSFET yang berkemampuan setara, tetapi harga IGBT yang diproduksi kini secara signifikan lebih rendah. Hal ini disebabkan die untuk IGBT 400-600 volt dapat dilakukan pada luasan sekitar 40% saja dari ukuran pada die yang dibutuhkan untuk membuat MOSFET yang berkemampuan setara.

Selain mengembangkan IGBT, IXYS yang berlokasi di Santa Clara, California kini juga membuat piranti yang mereka beri nama biMOSFET. BiMOSFET ini, yang merupakan IGBT basis homogen, strukturnya memiliki empat terminal; dua buah terminal gate, sebuah terminal emitor dan sebuah terminal kolektor. Ia dapat digunakan sebagai penyakelar daya 600 volt, yang bekerja pada frekuensi di antara 8kHz dan 60 kHz. Dari hasil pengujian, ternyata beberapa parameternya dapat melampaui IGBT dan MOSFET yang setara. BiMOSFET yang pertama dibuat, mereka beri nama IXBH40N160, ratingnya pada 1600 volt 40 ampere.

C. KESIMPULAN

Dari tulisan ini, dapat ditarik kesimpulan bahwa betapapun kerasnya persaingan antara Power MOSFET dan IGBT, maupun di antara pabrik pembuatnya, pasarlah yang akan menentukan. Masalah pokok yang menjadi perhatian bagi pabrik pembuatnya dalam merebut pasar tentu saja mencakup: harga piranti dalam dollar per Watt, rugi penyakelaran dan kecepatannya serta

kemampuannya untuk menangani daya besar dan tegangan tinggi, sesuai dengan tempat tujuan piranti tersebut akan digunakan, dan yang terakhir adalah ukuran fisik piranti. Selain itu pabrik juga akan memperhitungkan pangsa pasar bagi produknya baik untuk bidang kendali daya di industri maupun UPS.

D. DAFTAR PUSTAKA

- Bindra Ashok., (1998), *Silicon Direct Bonding Infuses Speed in High-Voltage IGBTs*, Electronic design.
- Goodenough Frank., (1997), *High-Voltage Power Switch; They're Faster and More Efficient*, Electronic design.
- Travis, Bill., (1996), *MOSFETs and IGBTs Differ in Drive Methods and Protection Needs*, EDN Asia.
- Wojslawowicz E, Jack (Harris Corp.), (1995), *Understanding Third-Generation IGBT Switch Characteristics*, Asian Electronics Engineer.