

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, pertama-tama, kami akan memberikan telaah mengenai devais LD MOSFET dengan beberapa keunggulannya. Struktur dasar dan prinsip kerja LD MOSFET akan didiskusikan. Selain itu, didiskusikan pula model-model nonlinier FET. Berikutnya, hal-hal yang berkaitan dengan penguat daya MW/RF dari mulai topologi dasar, kinerja, dan perancangannya juga dibahas. Metoda-metoda analisis nonlinier didiskusikan dan kemudian dilanjutkan dengan karakterisasi distorsi intermodulasi dua-nada.

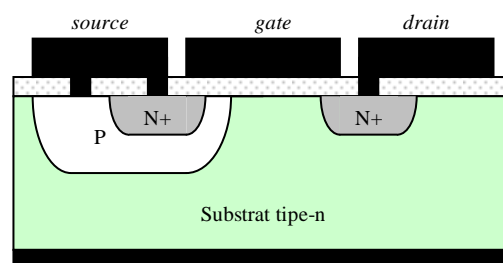
2.1 LD MOSFET

Pada awalnya, penguat daya gelombang mikro (MW) dan frekuensi radio (RF) untuk sistem komunikasi nirkabel tidak menggunakan devais berbasis silikon. Alasan utamanya adalah kinerja silikon yang tidak mendukung. Teknologi penguat daya MW/RF didominasi oleh teknologi GaAs karena GaAs memiliki kinerja dan efisiensi daya yang sangat baik pada frekuensi tinggi. Akan tetapi, keadaan tersebut berubah ketika lebar *gate* MOS dapat diperkecil hingga di bawah 0,5 μm sehingga dapat bekerja pada frekuensi tinggi. Devais kanal permukaan silikon dapat menghasilkan frekuensi maksimum lebih dari 65 GHz untuk panjang *gate* 0,1 μm dengan $V_{dd} = 2,0$ V. Karena devais ini dapat beroperasi pada catu

daya rendah, devais CMOS submikron untuk aplikasi linier frekuensi tinggi sedang mendapatkan banyak perhatian. Penguat daya LDMOS silikon menghasilkan kinerja dan efisiensi yang sangat baik pada daya keluaran tinggi pada 1,9 GHz hingga 2,6 GHz, menyaingi GaAs. Devais daya LDMOS silikon juga memberikan stabilitas yang baik dan konfigurasi rangkaian yang lebih sederhana daripada devais berbasis GaAs.

2.1.1 Struktur dasar

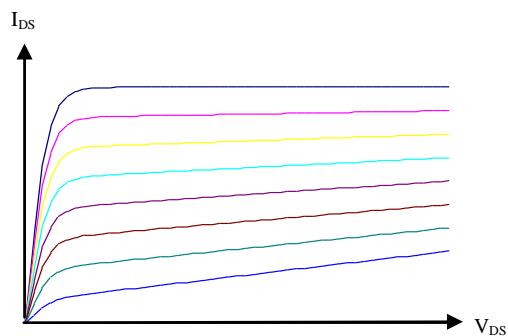
Struktur dasar LDMOSFET diilustrasikan pada Gambar 2.1. Seperti FET pada umumnya, LDMOSFET merupakan devais dengan tiga terminal yaitu *gate*, *drain*, dan *source*. Substratnya terbuat dari silikon tipe-n. *Drain* dan *source* merupakan daerah dengan doping N+. Akan tetapi, berbeda dengan MOSFET biasa, pada LDMOSFET daerah *source* (N+) berada pada daerah P yang didoping secara lateral. Doping P ini dimaksudkan untuk meningkatkan gain RF dan mencegah *punch-through* pada tegangan *drain-source*, V_{DS} , tinggi.



Gambar 2.1 Struktur dasar LDMOSFET.

2.1.2 Prinsip kerja

Prinsip kerja transistor dapat dipahami dari Gambar 2.1. Seperti FET pada umumnya, kerja LDMOS didasarkan pada pengaturan arus *drain* ke *source* oleh tegangan *gate*. Pada tegangan *gate-source*, V_{GS} , nol, *source* dan *drain* merupakan sambungan p-n yang terhubung saling membelakangi. Hanya arus bocor yang dapat mengalir dari *drain* ke *source*. Jika V_{GS} positif diberikan, lapisan inversi permukaan atau kanal dibentuk pada daerah p sehingga *source* dan *drain* terhubung oleh kanal n konduksi. Ketika tegangan *drain-source*, V_{DS} , diberikan, arus akan mengalir dari *drain* ke *source*. Konduktansi kanal ini dapat dimodulasikan dengan mengubah-ubah V_{GS} .



Gambar 2.2 Kurva karakteristik I-V FET secara umum.

Jika V_{DS} kecil diberikan, arus akan mengalir dari *drain* ke *source* melalui kanal konduksi. Kanal bertindak sebagai resistor dan arus *drain* sebanding dengan V_{DS} . Ini merupakan daerah linier. Jika tegangan *drain* meningkat, akan dicapai suatu titik dimana lebar kanal menjadi nol, disebut titik *pinch-off*. Pada titik *pinch-*

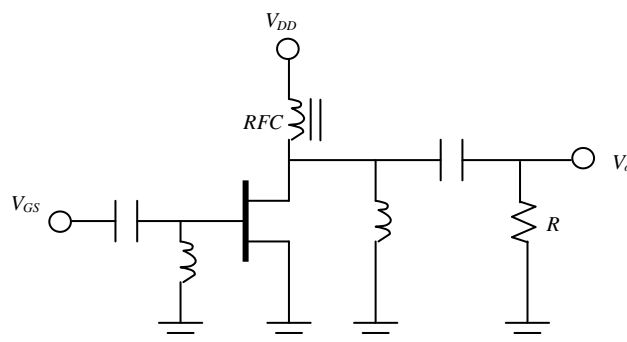
off, arus *drain-source* relatif konstan. Arus drain sebagai fungsi V_{GS} dan V_{DS} ditunjukkan pada Gambar 2.2.

2.2 Penguat Daya MW/RF

Pada sistem komunikasi modern, penguat daya gelombang mikro dan frekuensi radio memiliki peranan yang signifikan. Beberapa hal yang berkaitan dengan penguat daya dibahas pada bagian berikut.

2.3.1 Topologi dasar

Ada tiga macam topologi penguat daya, yaitu penguat daya *source* bersama, *drain* bersama, dan *gate* bersama. Akan tetapi, topologi yang umumnya dipakai adalah penguat daya *source* bersama, karena memiliki linieritas yang lebih baik daripada topologi lainnya. Topologi *source* bersama ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Topologi penguat daya *source* bersama.

2.3.2 Kinerja

Ada beberapa parameter untuk menyatakan kinerja penguat daya. Parameter tersebut dijelaskan secara singkat pada paragraf berikut [7].

Parameter pertama yang menyatakan kinerja penguat daya adalah daya keluaran. Level daya keluaran sebuah penguat daya diberikan oleh persamaan berikut:

$$P_{out} = \frac{(V_{ds} - V_{sat})^2}{2R_L} \quad (2.1)$$

dengan P_{out} adalah daya keluaran penguat, V_{ds} adalah tegangan *drain-source*, V_{sat} adalah tegangan saturasi transistor, dan R_L adalah resistansi beban.

Selanjutnya, perbandingan antara level daya keluaran dan level daya masukan disebut gain (penguatan). Secara matematis, gain penguat dinyatakan sebagai

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.2)$$

dengan P_{in} adalah level daya masukan pada penguat.

Parameter yang menggambarkan seberapa besar daya masukan DC yang diubah menjadi daya keluaran MW/RF disebut efisiensi *drain*. Secara matematis, efisiensi *drain* didefinisikan sebagai perbandingan antara daya keluaran MW/RF dan daya masukan DC sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad (2.3)$$

dengan P_{DC} adalah daya yang dihasilkan dari sumber DC, yaitu perkalian antara tegangan *drain-source* dan arus *drain*.

Selain itu, parameter lain yang sering digunakan adalah efisiensi penambahan daya (PAE), yang dinyatakan oleh

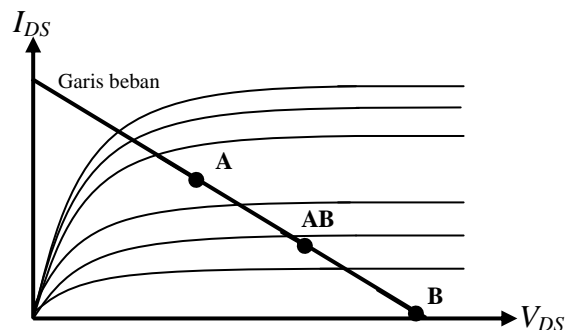
$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (2.4)$$

Dengan memperhatikan Persamaan (2.3) dan Persamaan (2.4), Persamaan (2.16) dapat disusun kembali menjadi:

$$PAE = \eta \left(1 - \frac{1}{G} \right) \quad (2.5)$$

2.3.3 Klasifikasi

Kelas penguat ditentukan oleh *bias* yang diberikan pada transistor. Terdapat beberapa kelas penguatan yang berbeda. Kelas-kelas yang populer adalah kelas A, B, dan AB. Gambar 2.4 menunjukkan titik kerja masing-masing kelas penguat daya.



Gambar 2.4 Titik-titik *bias* yang mungkin untuk penguat kelas A, B, dan AB.

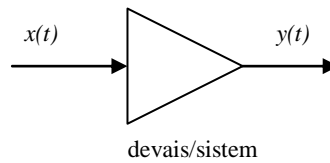
Pada penguat kelas A, kondisi *bias* memungkinkan arus keluaran mengalir setiap saat berkaitan dengan sudut konduksi transistor sebesar 360° . Penguat kelas A merupakan tipe penguat yang sangat linier dan memiliki efisiensi maksimum 50%.

Sementara itu, penguat kelas B memiliki sudut konduksi 180° . Efisiensi maksimumnya 78,5% sehingga lebih efisien daripada penguat kelas A. Akan tetapi, linieritas penguat kelas B lebih rendah dibandingkan kelas A dan, akibatnya, keluarannya mengalami distorsi.

Penguat kelas AB didesain untuk melakukan *trade-off* antara linieritas dan efisiensi. Pada penguat kelas AB, arus drain mengalir pada sudut konduksi antara 180° dan 360° dari sinyal input. Efisiensi kelas ini antara 50% dan 78.5%.

2.4 Sistem Linier dan Nonlinier

Pada dasarnya, semua devais memiliki sifat linier dan nonlinier sekaligus. Devais dikatakan linier apabila sifat nonliniernya sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Penguat daya, misalnya, yang dioperasikan dengan sinyal masukan kecil, sifat liniernya akan lebih dominan dibandingkan dengan sifat nonliniernya sehingga sifat nonliniernya dapat diabaikan. Akan tetapi, jika ia diberi sinyal masukan besar, sifat nonliniernya memberikan pengaruh yang cukup dominan dan tidak dapat diabaikan.



Gambar 2.5 Devais/sistem dengan masukan $x(t)$ dan keluaran $y(t)$.

Untuk memahami sifat linier dan nonlinier devais, tinjau sebuah sistem dengan masukan $x(t)$ dan keluaran $y(t)$ seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5. Secara umum, keluaran suatu devais dapat diungkapkan menggunakan deret Taylor sebagai berikut:

$$y(t) = k_0 + k_1[x(t) - x_0] + k_2[x(t) - x_0]^2 + k_3[x(t) - x_0]^3 + \dots \quad (2.6)$$

dengan $x(t)$ berkaitan dengan komponen AC, x_0 berkaitan dengan komponen DC (titik kerja), dan k_n adalah koefisien distorsi orde ke- n . Secara matematis, koefisien distorsi orde ke- n dinyatakan oleh:

$$k_n = \frac{1}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x^n} [y(t)] \Big|_{x=x_0} \quad (2.7)$$

Dua term pertama pada Persamaan (2.6) menunjukkan sifat linier, sedangkan term-term berikutnya menunjukkan sifat nonlinier dari devais. Jika $[x(t) - x_0]$ kecil, term ketiga, keempat, dan seterusnya pada Persamaan (2.6) nilainya sangat kecil dan dapat diabaikan. Dengan kata lain, sifat nonliniernya dapat diabaikan sehingga Persamaan (2.6) menjadi

$$y(t) = k_0 + k_1[x(t) - x_0] \quad (2.8)$$

yang merupakan persamaan linier.

Pada rangkaian elektronika, sifat nonlinier devais umumnya tidak diinginkan, terutama untuk devais yang hendak diaplikasikan pada suatu sistem yang sifat liniernya menjadi syarat utama yang harus dipenuhi. Pada sistem komunikasi multikanal, misalnya, sifat nonlinier penguat daya dapat mengakibatkan sinyal keluaran terdistorsi dan muncul komponen-komponen frekuensi baru yang dapat berinterferensi dengan kanal lain yang berdekatan. Sifat nonlinier hanya diperlukan pada rangkaian seperti mixer dan pelipat ganda frekuensi atau dalam kasus tertentu yang sifat nonliniernya dapat dieksploitasi untuk keperluan fungsi tertentu.

2.5 Teknik-teknik Linierisasi

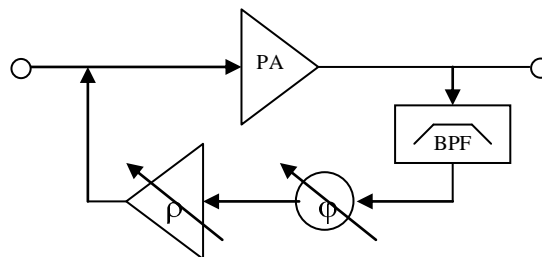
Selain kajian mengenai perilaku nonlinier berbasis eksitasi multinada, teknik-teknik untuk mendapatkan devais atau sistem yang linieritasnya tinggi terus dikembangkan. Teknik-teknik yang digunakan untuk melinierkan sistem disebut teknik linierisasi. Beberapa macam teknik linierisasi didiskusikan secara singkat pada paragraf berikut ini.

2.5.1 Teknik umpan balik

Salah satu bentuk teknik ini adalah menggunakan pita sempit sebagai umpan balik negatif pada masukan penguat. Pada teknik ini, untuk mempertahankan kestabilan dan mencapai peningkatan IMD yang baik, *delay* dalam jalur umpan balik harus

mendapat perhatian serius. Selain itu, filter pembatas pita harus ada dalam jalur umpan balik untuk kestabilan. Masalah-masalah kestabilan membatasi teknik ini pada sistem radio berpita sempit.

Bentuk umpan balik lainnya yang mendapat perhatian meningkat dewasa ini adalah umpan balik harmonik kedua seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Teknik ini mengumpanbalikkan sinyal harmonik kedua yang dihasilkan pada keluaran penguat daya kembali ke masukan penguat daya untuk mengurangi IMD orde ketiga. Nonlinieritas penguat menyebabkan interaksi antara sinyal-sinyal sumber dan harmonik kedua umpan baliknya. Pemilihan fase dan amplitudo harmonik kedua yang tepat memungkinkan untuk mendapatkan IMD orde ketiga yang dihasilkan oleh harmonik kedua menjadi di luar fase dan sama dalam amplitudo dari IMD orde ketiga yang asli. Dengan demikian, idealnya, IMD orde ketiga dapat dieliminasi semuanya.



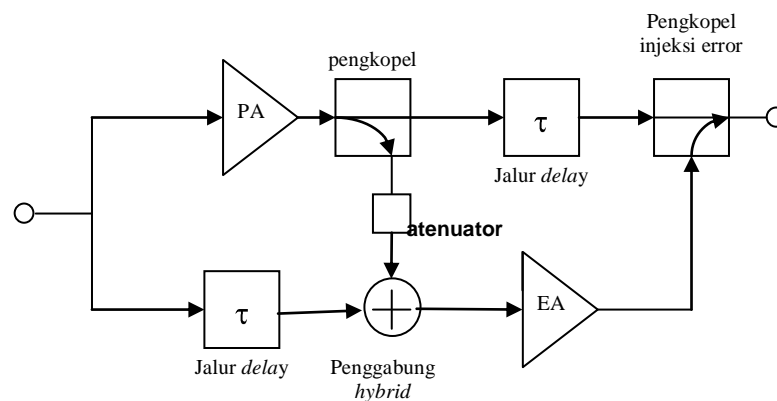
Gambar 2.6 Penguat umpan balik MW/RF dengan pengaturan gain dan fase untuk teknik umpan balik harmonik kedua.

2.5.2 Teknik umpan maju

Teknik umpan maju mampu melinierkan pita lebar, sinyal-sinyal multi-pembawa. Teknik ini konsepnya sederhana, tetapi dapat menjadi lebih mahal untuk mengimplementasikannya dalam bentuk perangkat keras. Dalam bentuknya yang paling sederhana, ada dua jalur: jalur penghilang sinyal dan jalur MW/RF utama. Pemisah hibrid (*hybrid splitter*) membagi daya antara dua jalur. Setengah daya input MW/RF diumpankan melalui jalur *delay* 180^0 . Setengah daya masukan MW/RF lainnya diumpankan ke penguat daya utama. IMD dibangkitkan dalam penguat daya ini dan keluarannya disampel dan diumpankan melalui penggabung hibrid (*hybrid combiner*) dimana ia dikombinasikan dengan sinyal dalam jalur *delay*. Dengan demikian, sinyal terdistorsi, yang telah diperkuat, dikombinasikan dengan sinyal masukan asli, yang ditunda sebesar 180^0 . Atenuator berfungsi untuk mengatur penyesuaian amplitudo antara dua sinyal: sinyal utama dihilangkan secara eksak sementara sinyal distorsi mengumpankan penggabung. Hasil distorsi ini kemudian diperkuat oleh penguat *error* kelas A yang linieritasnya tinggi. Sinyal dalam jalur atas pada keluaran penguat utama dan pengkopel merupakan sinyal RF yang diinginkan termasuk distorsi yang dibuat oleh penguat tersebut.

Sinyal dalam jalur bawah pada keluaran penguat *error* idealnya merupakan bentuk yang diperkuat dari distorsi yang hanya dibuat oleh penguat utama. Jalur *delay* dalam jalur atas diatur untuk mengompensasi *delay* dalam penguat *error* dalam jalur bawah. Hal ini karena kedua sinyal harus mencapai pengkopel keluaran 180^0 di luar fase. Selain itu, sinyal distorsi dalam jalur bawah harus memiliki amplitudo cukup untuk mengompensasi faktor penggandaan dalam

pengkopel penginjeksian *error* keluaran. Jika dua sinyal di luar fase 180^0 dan amplitudo hasil distorsi adalah sama, penghilangan distorsi yang sempurna mungkin terjadi dan menghasilkan sinyal MW/RF distorsi bebas pada keluaran sistem.



Gambar 2.7 Transmitter umpan maju.

Komponen yang paling kritis dalam sistem umpan maju adalah penguat error. Penguat ini tidak boleh menambah produk IMD sendiri dan harus memiliki gain tinggi dan *delay* propagasi minimal. *Delay* propagasi memengaruhi panjang jalur *delay* yang diperlukan dalam jalur atas sehingga sisipan hilang pada keluaran penguat utama. *Delay* yang eksekif menghasilkan efisiensi yang sangat rendah dan mengurangi perbaikan IMD. Selain itu, *delay* dan gain dalam sistem ini harus dikendalikan secara tepat untuk reduksi IMD yang ideal; jadi bentuk kendali harus diimplementasikan untuk mengatur gain dan delay. Pengolah sinyal digital (DSP) dapat digunakan untuk membentuk pengaturan gain dan *delay* ini, atau kinerja

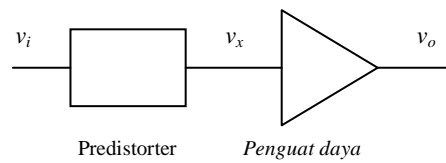
yang menurun dapat diterima berdasarkan pada kesalahan fase dan gain yang minimum dalam sistem. Meskipun teknik ini mahal untuk diimplementasikan, telah terbukti sangat efektif pada *wideband*, sinyal multipembawa seperti CDMA dan WCDMA. Ini merupakan keuntungan penting pada teknik linierisasi umpan maju, menjustifikasi mahalnya harga dan perangkat keras dalam sistem stasiun *base* dan satelit. Tetapi, teknik ini umumnya tidak praktis pada harga murah, ringan, dan terminal-terminal bergerak.

2.5.3 Teknik predistorsi

Predistorsi MW/RF adalah yang paling sederhana dan memiliki kemampuan untuk melinierkan semua pita frekuensi gelombang mikro dan frekuensi radio. Oleh karena itu, teknik ini sangat potensial untuk digunakan dalam pita lebar, sistem multipembawa. Selain itu, karena sederhana, ia dapat diintegrasikan langsung pada *IC* penguat dengan sedikit dampak pada ukuran dan kompleksitasnya.

Suatu bentuk kendali atau pengaturan diperlukan untuk mendapatkan derajat linieritas yang tinggi, meskipun ini tidak selalu. Predistorsi MW/RF sama dengan predistorsi pita dasar adaptif kecuali bahwa predistorsi dilakukan segera sebelum penguat MW/RF. Tidak ada umpan balik dalam teknik ini, jadi ini merupakan sistem loop terbuka. Ini berarti bahwa distorsi yang dihilangkan harus diketahui terlebih dahulu. Predistorter membangkitkan sinyal distorsi yang berlawanan

dengan penguat MW/RF. Jika generator distorsi dan penguat dikaskade bersama, distorsinya hilang.



Gambar 2.8 Teknik linierisasi predistorsi.

Biasanya, IMD orde ketiga yang menjadi perhatian utama. Oleh karena itu, predistorsi kubik digunakan untuk mengurangi produk IMD orde ketiga yang dibangkitkan penguat daya. Hasil yang sangat baik dapat dicapai menggunakan teknik ini.