

APLICAÇÕES DA ELECTRÓNICA NA ARTE MILITAR

Miniaturização dos meios rádio e radar. Maseres e laseres*

3 — A ELECTRÓNICA INTEGRADA. MINIATURIZAÇÃO DOS MEIOS RÁDIO E RADAR

3.1 — CIRCUITOS INTEGRADOS

Um circuito integrado é um conjunto de elementos ou, melhor dizendo, de acções elementares de resistência, de capacidade, de díodo, de transistor, segundo um esquema funcional complexo. Um circuito integrado pode tomar a forma de um pequeníssimo bloco monolítico semiconductor; ou a forma de películas que, por deposição, formam os diferentes elementos; nos dois casos há um substrato comum e um processo contínuo na formação dos elementos do circuito.

Os circuitos integrados semicondutores parece virem a ter papel preponderante; a concepção e a fabricação destes circuitos são baseadas nas técnicas que se desenvolvem dia a dia no domínio dos semicondutores, especialmente do silício. A concepção, a fabricação e a aplicação dos circuitos integrados fazem parte da chamada «Electrónica Integrada» ou «Microelectrónica»⁽²⁾; a razão da primeira destas designações é evidente; quanto à segunda, deriva das dimensões minúsculas dos circuitos: um circuito integrado com várias centenas de elementos, abrangendo várias funções de molde a constituir uma unidade muito complexa, pode ter a forma de uma pequena pastilha com alguns milímetros de extensão.

Foram as aplicações militares que promoveram o arranque inicial no desenvolvimento da electrónica integrada. O primeiro equipamento completo com circuitos integrados foi um «processador» projectado e construído sob o patrocínio do «Manufacturing Technology Laboratory» da Força Aérea dos Estados Unidos. Outros marcos históricos na evolução da electrónica integrada são: 1) o sistema de guiamento do «Minuteman»; 2) o computador de guiamento do «Apollo»; e 3) o «processador» do avião w2F; todos estes sistemas estão a demonstrar vantagens muito importantes das técnicas da electrónica integrada sobre as técnicas convencionais de utilização de componentes separados.

3.2 — VANTAGENS DA «ELECTRÓNICA INTEGRADA» EM SISTEMAS DE DEFESA

Foi só em 1959 que o Secretariado da Defesa dos E. U. A. iniciou o primeiro programa de investigação e desenvolvimento no campo da electrónica integrada; desde então, têm sido dispendidas, neste domínio, somas muito elevadas por organismos militares dos E. U. A. e de países europeus e as técnicas da electrónica integrada têm-se desenvolvido com extrema rapidez, ultrapassando as previsões mais optimistas feitas há três ou quatro anos. Em todos os países, o ímpeto dado a este desenvolvimento deve-se essencialmente aos respectivos Departamentos de Defesa. Além disso, pode dizer-se que, pelo menos nos próximos dez anos,

* Conferência proferida pelo Professor Engenheiro ANTÓNIO A. DE CARVALHO FERNANDES no Instituto de Altos Estudos Militares em Lisboa, no dia 8 de Abril de 1965. Conclusão do número anterior.

⁽²⁾ Há ainda quem lhe dê a designação de «Electrónica Molecular».

o mercado mais importante para circuitos integrados será o dos serviços militares.

Do ponto de vista das aplicações militares, os circuitos integrados apresentam as seguintes vantagens principais: 1) muito maior segurança de funcionamento; 2) custos mais reduzidos; 3) manutenção muito mais simples e, conseqüentemente, mais económica; 4) maior eficácia; 5) maior flexibilidade de projecto; e 6), por último, dimensões mais reduzidas e menor consumo de energia. Destas vantagens, a primeira é a mais importante. Estou certo de que todas as pessoas que me escutam já passaram pela experiência extremamente desagradável de se lhes avariar um sistema electrónico de comunicações ou de comando. E estou certo de que é nas aplicações militares que o problema da segurança de funcionamento se põe com maior dramatismo.

A segurança de funcionamento nos circuitos integrados é incrivelmente elevada. Para dar um exemplo concreto, os computadores do «Apollo», que têm 13 000 circuitos, foram montados e ensaiados no «Massachusetts Institute of Technology»; estes modelos tiveram mais de 33 milhões de circuito-hora sem uma avaria; e a que se verificou ao fim deste período, era de natureza mecânica, ligada à montagem. Hoje, espera-se que dentro de poucos anos os circuitos integrados complexos possam assegurar uma taxa de avarias de cerca de um décimo-milésimo (0,0001) por cento por cada 1000 horas de funcionamento.

Quanto ao custo, não há ainda unanimidade de opiniões sobre a vantagem imediata dos circuitos integrados. Espera-se, contudo, que venham a custar menos que os circuitos convencionais com elementos individuais e que venham a ser possíveis grandes economias quando as produções atingirem volumes elevados.

A manutenção de equipamentos com circuitos integrados é muito mais simples do que a dos equipamentos convencionais, pois que se avariam muito menos; por outro lado, a sua reparação está, em geral, fora de causa; em vez de se repararem, substituem-se.

Em relação aos E. U. A., cerca de 150 000 militares estão presentemente ocupados na manutenção de equipamentos electrónicos de comunicações e da parte electrónica dos sistemas de armamento. À medida que forem utilizados equipamentos com circuitos integrados, poderá reduzir-se progressivamente o pessoal militar de manutenção, com vantagens evidentes dos pontos de vista militar e económico; uma redução de 20% levava a uma redução de 30 000 homens.

Que os novos circuitos integrados serão mais eficazes, do ponto de vista militar, parece claro, pois que o tempo de afinação, de conservação e de verificação será muito menor; a economia resultante desta vantagem é também evidente.

Que exista maior flexibilidade no projecto de circuitos integrados do que no de circuitos convencionais compreende-se, se pensarmos que, em electrónica integrada, jogamos mais com funções elementares do que com componentes discretos de circuito.

Por outro lado, o projecto assume aspectos peculiares prestando-se a ser tratado por meio de computadores que, com base num número reduzido de funções elementares disponíveis, encontram as diferentes soluções práticas que se apresentam para se conseguir a função complexa global que está em causa.

Finalmente, o volume, o peso e o consumo de energia são vantagens bem evidentes sobretudo nalgumas aplicações.

3.3 — APLICAÇÕES EM EMISSORES/RECEPTORES PARA FINS MILITARES

Nalguns países europeus e nos E. U. A. está a ser estudada a aplicação da electrónica integrada em equipamentos militares de radiocomunicações e, presentemente, a conclusão geral parece ser que em certas partes dos equipamentos convém usar circuitos integrados mas noutras partes é ainda necessário empregar componentes individuais. Os circuitos integrados podem ser do tipo de película por deposição num substrato de vidro ou porcelana ou podem ser blocos monolíticos semicondutores; os componentes são especialmente projectados para terem as dimensões o mais reduzidas possível e apresentarem ainda uma configuração geométrica tal que a sua montagem possa ser compacta, com a maior economia de espaço. A miniaturização ou, melhor, a microminiaturização dos meios rádio está pois, a processar-se segundo uma solução híbrida em que se adoptam aquelas três técnicas fundamentais. Esta solução híbrida tem em vista a obtenção de resultados óptimos quanto à segurança de funcionamento e à satisfação das especificações técnicas em geral e ainda o mínimo custo de fabricação e manutenção. O volume e o peso dos equipamentos sofrem ainda uma redução espectacular.

Como exemplo da aplicação desta solução híbrida pode considerar-se um transceptor de UHF que está a ser projectado para o «Office of Naval Research» nos E. U. A., com o objectivo de se conseguir uma segurança de funcionamento de 18 000 horas, com um índice de confiança de 98%, sem manutenção e sem degradação de comportamento. A microminiaturização do equipamento deve levar-se ao extremo possível.

A faixa de funcionamento é de 225 a 400 Mc/s, a potência de saída como emissor é de 10 W e é sintonizável em um dos 1750 canais separados de 100 kc/s. A escolha do canal

é feita por um selector de seis posições, no painel frontal, de entre seis canais presintonizados. O receptor tem uma sensibilidade de $5\mu V$ para uma saída de A.F. de 5 W e a largura de faixa da F.I. é de 150 kc/s.

A elevada segurança de funcionamento, que constitui o objectivo fundamental, só pode conseguir-se com circuitos integrados e com uma ordem de redundância apreciável e o equipamento em questão está a ser concebido com graus de redundância de 2 a 4 conforme as partes do circuito.

Segundo estudos teóricos sobre a influência do grau de redundância, e tomando como unidade de referência a vida de funcionamento dum ordem de redundância igual a 1 (portanto, sem redundâncias), essa vida de funcionamento aumenta oito vezes para uma ordem de redundância igual a 2 e trinta vezes para uma ordem de redundância igual a 5.

Do ponto de vista da construção, adoptou-se a solução híbrida de utilizar circuitos integrados de película fina nas partes do circuito em que a potência em jogo é suficientemente baixa e componentes separados em montagem compacta quando o nível de potência não permite a utilização de circuitos integrados. Com a microminiaturização que se consegue, é possível atingir dimensões muitíssimo pequenas apesar da redundância que se adopta no circuito. Por exemplo, os três andares de amplificação de RF do receptor estão contidos numa pastilha quadrada com 12 mm de lado e 2,5 mm de espessura; o volume do receptor (que tem, como se referiu, redundância de circuitos), sem o amplificador de A. F. de saída e sem o selector de canais, mas incluindo os filtros de cristal e os circuitos integrados, será de cerca de 100 cm³. O oscilador de cristal e o preamplificador de microfone no emissor são também em circuitos integrados; os outros andares utilizam componentes separados, todos miniaturizados, numa montagem compacta.

O exemplo prático a que me referi ilustra a situação presente no campo de emissores-receptores com uma potência de saída da ordem da dezena de Watt em que, como vimos, quase todo o receptor e os andares iniciais do emissor são formados por circuitos integrados; o andar de saída do receptor e os andares de potência do emissor utilizam transistores e outros componentes separados.

Contudo, nos casos de equipamentos radioeléctricos em que as potências em jogo são suficientemente baixas, podem utilizar-se circuitos integrados ou por deposição de película fina ou em blocos monolíticos semicondutores em quase todos os andares do equipamento. Por outras palavras, na solução híbrida a que me tenho referido, a predominância da electrónica integrada depende do nível de potência em jogo nos diferentes circuitos.

3.4 — APLICAÇÕES EM SISTEMAS MILITARES DE RADAR

Os sistemas militares de radar podem tomar variadíssimas formas, como já referi, utilizando potências que vão desde o megawatt até o microwatt, para diversas aplicações. Todos eles têm, contudo, um emissor e um receptor que requerem, em geral, que sejam mantidas com elevada precisão a frequência, a amplitude e o ângulo de fase dos sinais em jogo.

A aplicação da electrónica integrada em sistemas de radar apresenta problemas particularmente difíceis e, para a sua resolução, os organismos militares dos E. U. A. têm recentemente feito vários contratos com firmas particulares.

Das informações publicadas nesta matéria conclui-se que a electrónica integrada pode aplicar-se com vantagem nalgumas partes dos sistemas de radar, desde os mais pequenos, que pesam poucos quilogramas, até os gigantes de alta potência e que pesam várias toneladas. Como é evidente, as secções de alta potência destes últimos não são compatíveis com as técnicas da electrónica integrada e os circuitos integrados só podem aplicar-se nas secções de baixa potência do receptor e dos outros componentes do sistema.

Um receptor típico, transportável, de radar, tem mais de 100 tipos diferentes de circuitos e mais de 70 componentes ajustáveis no circuito. Para que se possa utilizar a electrónica integrada com grande vantagem é preciso projectar completamente os circuitos de molde a reduzir drásticamente o número de tipos diferentes de circuitos e o número de componentes ajustáveis. Também a selectividade de frequência requerida nos receptores de radar é muito difícil de conseguir com circuitos integrados.

Os diferentes problemas que se apresentam na miniaturização dos meios radar vão sendo progressivamente resolvidos e os circuitos integrados virão a ser cada vez mais utilizados. A solução híbrida, que está a adoptar-se nos meios rádio, é também a seguida na miniaturização dos meios radar.

Se se compararem as dimensões de um receptor de radar convencional (o modelo R-979/UPS-1) com um receptor miniaturizado equivalente, recentemente projectado, vemos que enquanto no primeiro há cerca de cem tipos diferentes de circuitos, no segundo há apenas vinte; que o número de componentes ajustáveis é reduzido de sessenta e cinco para nove; e que os comandos no painel baixam de dez para seis. A redução, em volume, é de mais de cem vezes e, em peso, de quase quarenta vezes. Quanto ao custo do equipamento miniaturizado, este será inferior ao do convencional se a produção se fizer em larga escala.

Para completar esta conferência desejaria ainda fazer uma breve referência aos novos dispositivos da electrónica quântica, o maser e o laser.

4 — MASERES E LASERES

4.1 — INTRODUÇÃO

O termo «MASER» foi formado inicialmente pelas iniciais das palavras «*Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiation*». Foi esta a designação dada pelos cientistas da Universidade de Columbia que, em 1954, conseguiram pela primeira vez produzir e amplificar micro-ondas estimulando a emissão de radiação a partir de moléculas de amoníaco.

Mais tarde, em 1959, foi possível estender este efeito às ondas luminosas de frequências muito acima das micro-ondas, e a palavra «*microwave*» foi substituída por «*Light*» formando-se assim o novo termo «LASER».

Alguns puristas insistem hoje que no termo MASER, a primeira letra deveria corresponder à palavra «Molecular» na expressão «Molecular Amplifier by Stimulated Emission of Radiation» e que este termo deveria aplicar-se aos dispositivos trabalhando quer com micro-ondas quer com ondas de luz. Neste caso, deveria usar-se a designação «maser óptico» em vez de «laser».

A palavra «laser» está já, contudo, generalizada e os dispositivos «laser» tendem a desenvolver-se com características próprias de modo que há grande probabilidade de se manter esta designação de preferência à de «maser óptico».

A grande virtude do primeiro maser inventado na Universidade de Colúmbia, utilizando amoníaco como meio activo, consistiu na demonstração prática do princípio da emissão estimulada. De então para cá, outros tipos de maser foram desenvolvidos e estão a ser utilizados em várias aplicações. É, contudo, o descendente do maser, o laser, que tem tido um desenvolvimento mais espectacular e que se apresenta com possibilidades que ainda hoje se não vislumbram completamente.

O maser pode ser utilizado como oscilador e como amplificador de micro-ondas. Como amplificador apresenta a característica notável de ter um ruído interno muitíssimo mais baixo do que qualquer outro dispositivo amplificador de que hoje se dispõe. Esta característica torna possível a recepção de sinais radioeléctricos extremamente fracos. Na estação receptora terrestre do satélite «Telstar» no Maine, nos E. U. A., utiliza-se um maser de rubi, de onda progressiva, trabalhando a uma temperatura próxima do zero absoluto; o receptor pode detectar sinais com uma potência de menos de 10^{-14} W o que representa uma sensibilidade elevadíssima que não poderia ser conseguida senão com amplificadores maser. De um modo geral, as estações terrestres de recepção para comunicações com satélites utilizam amplificadores maser.

O laser veio oferecer pela primeira vez a possibilidade de produzir e amplificar luz coerente e abrir assim o espectro

das frequências de luz à exploração pelas técnicas clássicas no espectro das radiofrequências.

4.2 — CONSIDERAÇÕES SOBRE O «LASER»

Os elementos essenciais de um laser são: 1) uma «cavidade ressonante» que é constituída basicamente por dois espelhos orientados com grande precisão, um dos quais é ligeiramente transparente; 2) um meio activo, no espaço entre os espelhos, que pode ser ou um gás ou um cristal contendo certos átomos estranhos (por exemplo átomos de crómio num cristal de óxido de alumínio — um átomo de alumínio em cada 5000 é substituído por um átomo de crómio — no caso do rubi), ou ainda um semiconductor.

Este meio activo possui dois estados atómicos de energia com uma separação que corresponde à frequência de operação desejada; e tem que ser possível sobrepovoar o estado de energia superior em relação ao inferior, «bombando» átomos de um estado de energia para outro estado de energia mais elevado; esta operação de «bombagem» pode fazer-se ópticamente ou electricamente.

Do estado superior artificialmente, sobrepovoado, alguns átomos caem espontaneamente para o estado inferior e emitem luz incoerente que é radiada ao acaso em todas as direcções. Contudo, na presença da cavidade ressonante, parte desta emissão espontânea vai excitar um dos «modos ressonantes» da cavidade e o campo electromagnético associado com a ressonância vai induzir ou estimular a emissão no meio activo. Esta emissão induzida é coerente em fase com o campo que a induz e, como resultado, se a interacção for suficientemente forte, forma-se uma onda electromagnética coerente, correspondendo a um dos modos da cavidade ressonante. Alguma desta energia vai escapar-se pelo espelho parcialmente transparente (que constitui um dos extremos da cavidade) sob a forma de um feixe, nitidamente definido, de luz coerente, constituindo uma onda electromagnética coerente plana.

A definição de coerência espacial e temporal da radiação pode dar-se facilmente do ponto de vista matemático. Para se entender, contudo, o significado físico, basta mencionar a analogia clássica com as ondas numa piscina. A radiação incoerente faz lembrar a disposição das ondas na superfície da água depois de os nadadores terem saído: ondas de todos os comprimentos movem-se em todas as direcções ao acaso e não há correlação entre as funções do tempo que representam as amplitudes em dois pontos da piscina francamente separados. Se a piscina estivesse rodeada por água parada, ao mesmo nível, e as paredes fossem subitamente retiradas, a agitação espalhar-se-ia em todas as direcções, com diferentes comprimentos de onda, segundo um padrão análogo ao da radiação incoerente.

Suponhamos agora que tínhamos uma piscina com água inicialmente parada e que promovíamos um movimento

periódico de oscilação de uma boia comprida situada ao longo de um dos lados da piscina; neste caso, produzem-se ondas planas com coerência espacial e temporal e se as paredes da piscina fossem retiradas, as ondas propagar-se-iam segundo uma direcção perpendicular à boia; e se, ainda, o comprimento de onda fosse pequeno comparado com o comprimento da boia, o feixe da onda pouco se espalharia à medida que progredisse.

Nos lasers de rubi, trabalhando em impulsos, a potência de saída pode ser muito elevada; para uma potência de 10 kW e impulsos de 1 ms a energia total por impulso é de 10 Joule. A coerência não é, contudo, perfeita embora os defeitos que se verificam presentemente possam vir a ser reduzidos no futuro. Os lasers de gás, funcionando em onda contínua, trabalham com níveis de potência relativamente baixos — da ordem de 20 mW — mas têm excelente coerência.

Para a potência de saída de 10 kW num laser de rubi seria possível, com uma lente ideal, alcançar uma densidade de potência da ordem de 10^{16} W/m². Como comparação pode mencionar-se que a densidade de potência à superfície do sol é menor que 10^8 W/m². Deste modo, o laser de rubi é teoricamente capaz de produzir uma densidade de potência cem milhões de vezes mais forte do que a que existe à superfície do Sol. Por outro lado, esta elevada densidade de potência é acompanhada por um campo eléctrico extremamente intenso, teoricamente de 2×10^9 V/m (ou seja dois milhões de Volt por milímetro). Campos eléctricos desta ordem de grandeza poderão ter aplicações ainda ignoradas sobretudo no domínio da estrutura molecular dos materiais.

Se, depois da operação de focagem a que me referi, o feixe de luz coerente passasse por um sistema óptico conveniente, poderia constituir um feixe intenso e estreito capaz de produzir uma elevada intensidade de iluminação a grandes distâncias.

Estas duas características do laser, a elevadíssima densidade de potência que permite e a possibilidade de emitir feixes muito estreitos e intensos de luz coerente estão na base das suas aplicações presentes e futuras.

4.3 — APLICAÇÕES DOS «LASERES». REFERÊNCIA À ARTE MILITAR

As possibilidades que os lasers ou maseres ópticos oferecem em vários campos excitam o interesse dos cientistas e dos técnicos.

Nos campos da Física e da Química, o laser dá a possibilidade de explorar a estrutura molecular e a natureza das reacções químicas; permite ainda, pela concentração de energia de que é capaz, influenciar de novas maneiras, as reacções químicas.

No domínio da transmissão de energia, o laser poderia constituir como que uma linha de transmissão; com lentes de focagem a intervalos regulares e na ausência de atmosfera seria teoricamente possível conseguir uma perda de apenas 0,05 % por 30 km.

Com um laser dos tipos existentes, seria possível, com a focagem conveniente, aquecer uma cafeteira de água a uma distância de 1600 km.

Neste momento, os problemas tecnológicos relativos à «Bombagem» a que me referi constituem um grande obstáculo à utilização do laser como meio de transmissão de energia.

Se não fora este obstáculo, poder-se-ia, por exemplo, fazer esta transmissão para um satélite com o fim de alimentar um equipamento de baixa potência.

No campo do radar, a luz laser oferece importantes vantagens sobretudo por permitir trabalhar a distâncias muito maiores que o radar de micro-ondas e detectar objectos muito mais pequenos.

De acordo com cálculos realizados, com a utilização de espelhos de 60 cm de diâmetro e um feixe laser de 16 W, a distância de um objecto a cerca de 160 km pode ser medida com uma precisão da ordem de 1 ou 2 m.

Há também aplicações na medida de velocidade que pode fazer-se com maior rigor do que com o radar de micro-ondas; esta vantagem é especialmente importante na determinação rigorosa da velocidade dos satélites.

No domínio das comunicações, um feixe de laser pode assegurar uma largura de faixa imensa e permitir a transmissão simultânea de muitos milhões de comunicações telefónicas.

Em processos físicos diversos, o laser oferece possibilidades do maior interesse como ferramenta industrial, como dispositivo de investigação e ainda como instrumento cirúrgico. As operações de colagem de retina já hoje são normalmente feitas por feixes laser.

Todas as aplicações do laser a que me referi têm implicações militares em maior ou menor grau. A utilização do laser como arma propriamente dita poderá vir a ter uma importância vital no futuro; feixes de laser para cegar tropas inimigas e para provocar incêndios a distância poderão já hoje ser utilizados. Muito se tem especulado, ainda, quanto à possibilidade de utilização do feixe laser como «raio da morte»; parece, contudo, claro que seria preciso, para isso, dispor de potências de radiação extremamente intensas e muito além do que, neste momento, se considera prático conseguir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- P. C. SANDRETTO — *Electronics Avigation Engineering* — I. T. T., Nova Iorque, 1958.
- R. M. PAGE — *The early history of radar* — Proceedings of the I. R. E., pp. 1232-1236, Maio, 1962.
- S. RAMO — *The impact of missiles and space on electronics* — Proceedings of the I. R. E., pp. 1237-1241, Maio, 1962.
- J. D. O'CONNELL, A. L. PACHYNSKI, L. S. HOWETH — *A summary of military communication in the United States, 1860 to 1962* — Proceedings of the I. R. E., pp. 1241-1251, Maio, 1962.
- A. A. DE CARVALHO FERNANDES — *A evolução da electrónica e das suas aplicações* — Boletim da Academia das Ciências, pp. 121-137, Vol. XXXV, 1963.
- P. E. HAGGERTY — *Integrated Electronics, A Perspective* — Proceedings of the I. E. E. E., pp. 1400-1405, Dez., 1964.
- J. M. BRIDGES — *Integrated Electronics in Defense Systems* — Proceedings of the I. E. E. E., pp. 1405-1411, Dez., 1964.
- G. W. A. DUMMER — *Integrated Electronics Development in the United Kingdom and Western Europe* — Proceedings of the I. E. E. E., pp. 1412-1425, Dez., 1964.
- W. E. MONTGOMERY, C. H. WOOD, W. R. OLSON, R. M. FRAZIER, G. R. BRAINERD — *Application of Integrated Electronics to Military Communications and Radar Systems* — Proceedings of the I. E. E. E., pp. 1721-1731, Dez., 1964.
- B. M. OLIVER — *Some Potentialities of Optical Masers* — Proceedings of the I. R. E., pp. 135-141, Fev., 1962.

Por absoluta falta de espaço fomos obrigados a retirar a última parte de «ELEMENTOS DE COMBUSTÍVEL PARA CENTRAIS NUCLEARES COM REACTORES TÉRMICOS CONVERSORES. ALGUNS ASPECTOS INDUSTRIAIS», de que é autor o engenheiro Abílio Fernandes, e a conclusão da tradução do Caderno Suíço de Segurança no Trabalho n.º 20: «Os perigos da electricidade estática», falta de que pedimos desculpa aos nossos leitores.
