

1 Introdução

Os detectores de infravermelho intrínsecos na faixa do infravermelho distante (6-15 μ m) são baseados em transições interbanda, que promovem um elétron através da banda de energia proibida (E_g) a partir da banda de valência até a banda de condução, conforme ilustrado na figura 1.1.

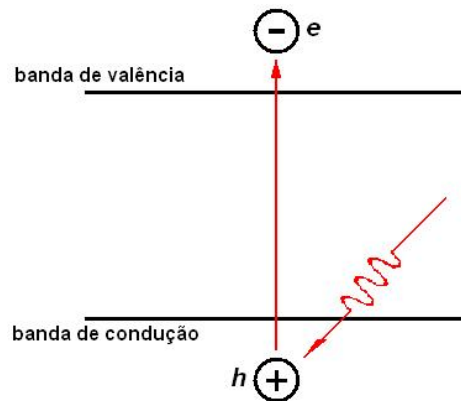


Figura 1.1 – Diagrama de bandas de um fotodetector de infravermelho intrínseco convencional.

Esses elétrons fotoexcitados podem ser coletados eficientemente, produzindo portanto uma fotocorrente em um circuito externo. Visto que o fóton incidente precisa excitar um elétron da banda de valência para a banda de condução, a energia do fóton ($h\nu$) deve ser maior que E_g do material fotosensível. Portanto, a resposta espectral dos detectores pode ser sintonizada através do controle de E_g do material fotosensível. Exemplos de tais materiais são o $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ e o $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, nos quais o *gap* de energia pode ser controlado variando-se o valor de x . Isso significa que a detecção de radiação no infravermelho distante requer pequenos *gaps* de energia. É bem conhecido que esses materiais com banda proibida estreita são muito mais difíceis de crescer e processar do que semicondutores com banda proibida larga, tais como o GaAs. Essas dificuldades motivaram a exploração de outras alternativas, dentre elas estruturas de poços

quânticos múltiplos (MQW) formadas a partir de materiais com banda proibida larga (figura 1.2).

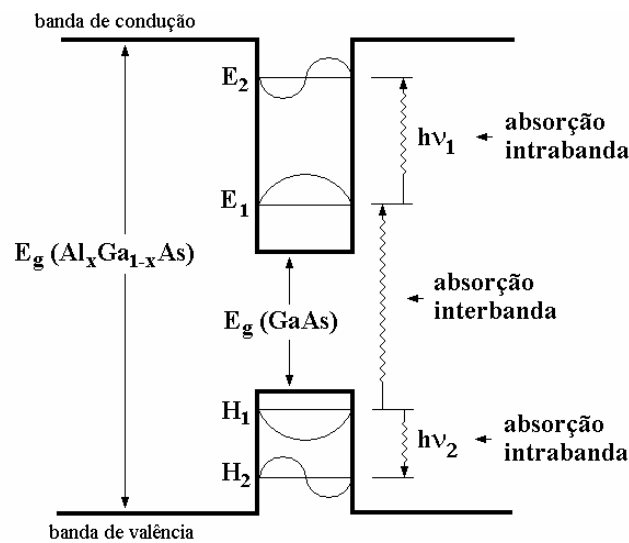


Figura 1.2 – Diagrama de bandas esquemático de um poço quântico. Absorção intrabanda pode ocorrer entre os níveis de energia de um poço quântico associados com a banda de condução (dopagem n) ou de valência (dopagem p).

A idéia de usar estruturas MQW para detecção de radiação infravermelha pode ser explicada por meio dos princípios básicos da mecânica quântica. O poço quântico é equivalente ao problema da mecânica quântica bem conhecido de uma partícula em uma caixa, que pode ser resolvido através da equação de Schrödinger independente do tempo. As soluções para esse problema são os auto-valores que descrevem os níveis de energia dentro do poço quântico nos quais é permitido que a partícula exista. As posições dos níveis de energia são primariamente determinadas pelas dimensões dos poços quânticos (largura e altura). Para barreiras infinitas e bandas parabólicas, os níveis de energia em um poço quântico são dados por (Weisbuch, 1987)

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{n\pi}{L_w} \right)^2 \quad (1.1)$$

onde L_w é a largura do poço quântico, m^* é a massa efetiva do portador dentro do poço quântico, e n é um inteiro. Assim, a energia intrabanda entre o estado fundamental e o primeiro estado excitado é

$$(E_2 - E_1) = \frac{3\hbar^2 \pi^2}{2m^* L_w^2} \quad (1.2)$$

Os efeitos de confinamento quântico nestas heteroestruturas provocam a transformação das bandas contínuas de energia que existem no semiconductor (bandas de condução e de valência) em estados discretos, na direção de crescimento das camadas. Esta quantização dos estados de energia permite a observação de transições intrabanda. As transições intrabanda ocorrem entre subníveis da mesma banda, por exemplo, entre os dois primeiros subníveis da banda de condução. O estudo destas transições permite esclarecer vários aspectos importantes sobre a física nos poços quânticos.

O sistema material GaAs–Al_xGa_{1-x}As com redes casadas (*lattice-matched*) é um candidato muito bom para se produzir tal estrutura de poços quânticos, visto que a banda proibida do Al_xGa_{1-x}As pode ser modificada variando-se o valor de x (e portanto a altura do poço quântico). Assim, modificando-se a largura do poço quântico L_w e a altura da barreira (fração molar de Al da liga Al_xGa_{1-x}As), a energia de transição intrabanda pode ser variada sobre uma grande faixa, desde o infravermelho próximo (*near wavelength infrared* - NIR; 0,75 – 3μm) e médio (*mid infrared* - MIR; 3 – 6μm), passando pelo infravermelho distante (*far infrared* - FIR; 6 – 15μm) e entrando no infravermelho extremo (*extreme infrared* - XIR; 15 - 1000μm), conforme classificação adotada pelo INPE. É importante salientar que, diferente dos detectores intrínsecos, que utilizam transições interbanda, os poços quânticos desses detectores precisam ser dopados visto que a energia dos fótons é insuficiente para gerar portadores de corrente ($h\nu < E_g$).

A possibilidade do uso de estruturas MQW de GaAs–Al_xGa_{1-x}As para detecção de radiação infravermelha foi sugerida primeiramente por Esaki e Sakaki (1977), pesquisadas experimentalmente por Smith *et al* (1983), e analisadas teoricamente por Coon e Karunasiri (1984). A primeira observação experimental de forte absorção intrabanda foi desenvolvida por West e Eglash (1985), e o primeiro QWIP (*Quantum Well Infrared Photodetector*) foi demonstrado por Levine *et al* (1987b) na Bell Laboratories. Levine *et al* (1988) também introduziram QWIPs envolvendo transições intrabanda do tipo B-C (*bound-to-*

continuum) com barreiras de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ mais largas e com detectividade sensivelmente superior. Pesquisas recentes desses detectores já chegaram ao desenvolvimento de grandes matrizes de alta sensibilidade demonstrados por diversos grupos.

Para poços quânticos formados a partir de materiais de *gap* direto, a luz incidente normal à superfície não é absorvida porque a transição intrabanda requer que o campo elétrico da onda eletromagnética tenha componente normal ao plano dos poços quânticos (paralela à direção de crescimento). Esta regra de seleção de polarização demanda a criação de mecanismos que acoplem a luz ao detector. Dois esquemas típicos são mostrados na figura 1.3.

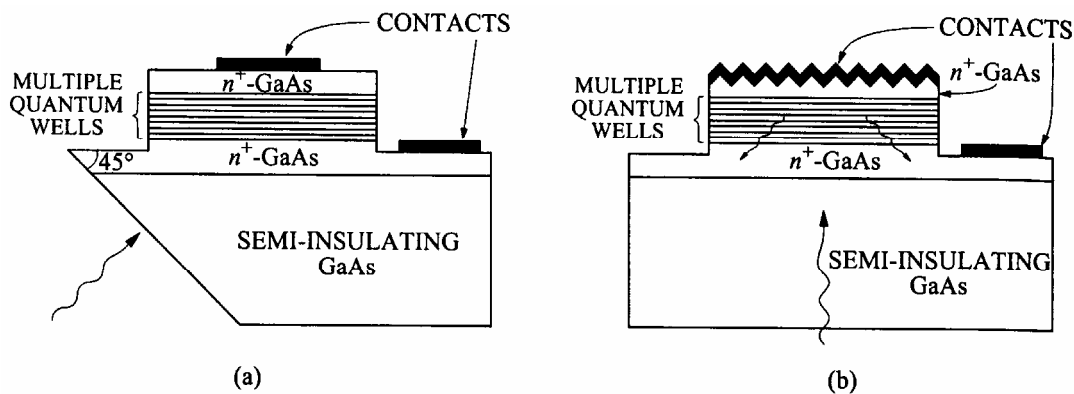


Figura 1.3 – Esquemas de acoplamento da luz em estruturas de QWIPs de GaAs/AlGaAs: (a) a luz incidente é normal a uma face polida com um ângulo de 45° em relação aos poços quânticos. (b) uma grade de difração é usada para refletir a luz vinda através do substrato (Ng, 2002)

Na figura 1.3a, uma face polida a 45° é feita na extremidade adjacente ao detector. Observa-se que o substrato é transparente ao comprimento de onda de interesse. Na figura 1.3b, uma grade confeccionada na superfície superior difrata a luz normal de volta para o detector, em ângulos que vão resultar em componentes do campo elétrico na direção de crescimento dos poços, melhorando a absorção. Essa regra de seleção, entretanto, não se aplica a poços quânticos tipo *p* ou poços formados por materiais de *gap* indireto, tais como as heteroestruturas SiGe/Si e AlAs/AlGaAs.

1.1. Aplicações dos QWIPs

a) Defesa Civil

Uma câmera QWIP portátil ajudou uma equipe de TV de Los Angeles a captar imagens de um incêndio que se propagou no sul da Califórnia em outubro de 1996. Essa câmera foi usada no helicóptero da estação de notícias. Essa câmera portátil possui detectores de infravermelho que cobrem comprimentos de onda maiores dos que os abrangidos pelas câmeras convencionais. Essa característica capacita a câmera a "ver" através da fumaça e localizar com detalhe os pontos quentes que não seriam normalmente visíveis. Isso permitiu que a estação de TV transmitisse imagens ao vivo dos pontos quentes em áreas que pareceriam inofensivas a olho nu. Esses pontos quentes foram uma fonte de preocupação para os bombeiros, visto que eles poderiam propagar novos incêndios mesmo após o fogo aparentemente ter diminuído. A figura 1.4 mostra a comparação das imagens no visível e no infravermelho de uma área recém incendiada, observada pela equipe de notícias à noite. A diferença de qualidade entre as imagens ocorreu tanto em condições diurnas quanto noturnas. Esse evento marcou a estréia da câmera QWIP como instrumento de observação de incêndios.



(a) Visível

(b) QWIP

Figura 1.4 – Comparação entre duas imagens de uma área incendiada, feitas à noite, uma com (a) uma câmera CCD no visível de alta sensibilidade e outra com (b) uma câmera QWIP no infravermelho distante (Guanapala *et al*, 2000).

Outra importante aplicação é o estudo de vulcões ativos. Uma câmera QWIP foi usada para observar vulcões, formações minerais, clima e condições atmosféricas no vulcão Kilauea, no Havaí. O objetivo dessa viagem foi identificar as características geotérmicas. A ampla faixa de comprimentos de onda coberta por esse tipo de câmera capacitou os vulcanologistas a obterem imagens de características vulcânicas em temperaturas muito maiores (300-1000°C) do que as que podiam ser visualizadas em sistemas convencionais de imagem térmica na faixa de 3 a 5 μ m ou no visível. A figura 1.5 mostra e comparação entre imagens no visível e no infravermelho do vulcão Kilauea no Havaí. A imagem do vulcão no infravermelho mostra claramente um leito subterrâneo de lava quente que não é visível a olho nu.

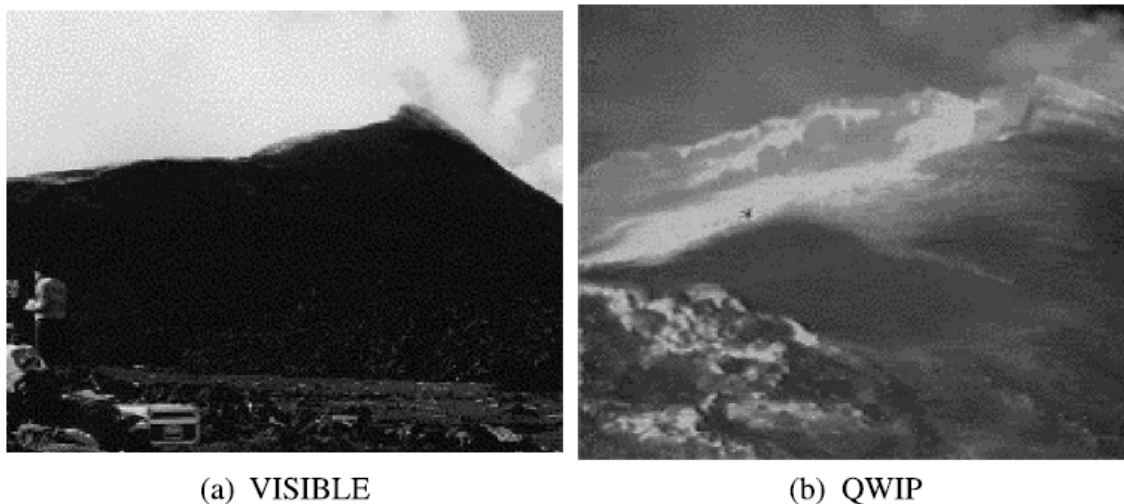


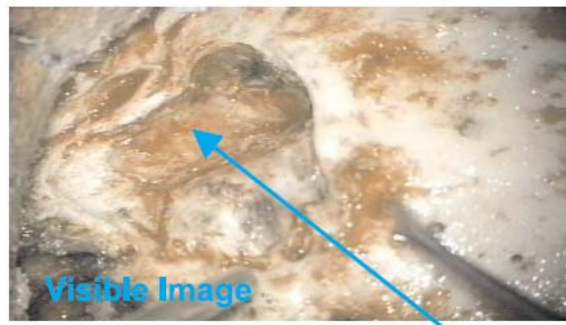
Figura 1.5 – Comparação de imagens do vulcão Kilauea, no Havaí, uma feita com (a) uma câmera CCD no visível de alta sensibilidade e outra com (b) uma câmera QWIP no infravermelho distante (Guanapala *et al*, 2000).

b) Medicina

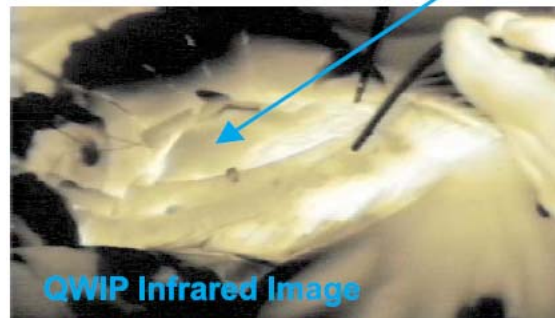
Estudos determinaram que as células do câncer liberam óxido nítrico, causando mudanças no fluxo de sangue no tecido em volta do câncer que podem ser detectadas através de um sensor térmico. Um grupo de pesquisadores da *State University of New York* e do WRAIR (*Walter Reed Army Institute of Research*) usaram câmera LWIR QWIP para Teletermometria de Área Dinâmica (DTA), uma técnica utilizada para estudar a fisiologia e pato-fisiologia da perfusão cutânea, que tem diversas aplicações clínicas. A técnica DTA envolve o

armazenamento de centenas de imagens consecutivas no infravermelho e análises de FFT (*Fast Fourier Transform*) da biomodulação e microhomogeneidade da temperatura da pele. A análise FFT fornece as frequências termoregulatórias e amplitudes da temperatura e a perfusão dos vasos capilares da pele. Para que se obtenham dados confiáveis a partir da DTA, é necessário uma câmera de infravermelho acima de $8\mu\text{m}$ (para evitar artefatos devido a reflexões de emissores variados no ambiente), uma taxa de repetição de 30Hz (possibilitando o armazenamento de um número máximo de imagens durante o período de observação para maximizar a resolução da FFT), estabilidade instrumental quadro-a-quadro (para evitar artefatos derivados de variação instrumental), e uma sensibilidade menor que 30mK. De acordo com esses pesquisadores, o comprimento de onda de operação mais longo, a maior resolução espacial, a maior sensibilidade e a excelente estabilidade das câmeras baseadas em matrizes de QWIPs as tornaram a melhor escolha entre os vários tipos de câmeras de IR. Essas duas tecnologias aliadas resultam na formação de uma imagem da área de interesse, possibilitando ao médico realizar o diagnóstico imediatamente, sem causar qualquer desconforto ao paciente e o uso de radiação ionizante. Basicamente, o sensor digital detecta a energia IR emitida pelo corpo, “enxergando” as pequenas diferenças de temperatura associadas com as alterações no fluxo de sangue.

Essa câmera também foi usada por um grupo de pesquisadores da University of Southern Califórnia em operações em cérebros, detecção de câncer de pele, e em pacientes com hanseníase. Na retirada de tumores cerebrais, a imagem térmica pode ajudar o cirurgião a encontrar pequenos vasos capilares que crescem na direção do tumor devido à angiogênese (figura 1.6). As células cancerosas geralmente têm uma alta taxa metabólica, demandando um maior abastecimento de sangue, o que é uma das características de um tumor maligno. Portanto, tecidos cancerosos são ligeiramente mais quentes do que os tecidos saudáveis. Uma câmera de imagem térmica sensível pode detectar facilmente a existência de um câncer de pele maligno (figura 1.7). A figura 1.8 mostra claramente o gradiente de temperatura dos pés e dos cotovelos de um paciente com hanseníase.

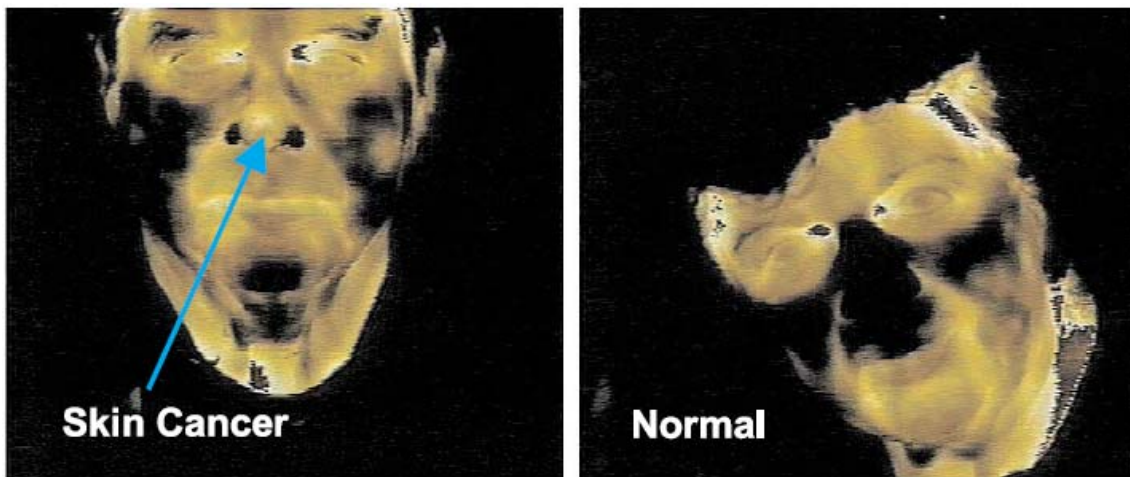


(a) Tumor cerebral



(b)

Figura 1.6 – (a) imagem no visível de um tumor cerebral (a maior parte das células cancerosas estão mortas devido às drogas sensíveis ao câncer). (b) Imagem IR discriminando os tecidos saudáveis dos mortos. (Gunapala *et al*, 2000).



(a)

(b)

Figura 1.7 – (a) A ponta do nariz está mais quente do que os tecidos vizinhos devido à atividade metabólica elevada (angiogênese) de um câncer de pele; (b) Rosto de uma pessoa que não tem câncer de pele no nariz. Normalmente, o nariz e as orelhas são mais frios em relação às outras partes da face, por se estenderem para fora do corpo (Gunapala *et al*, 2000).

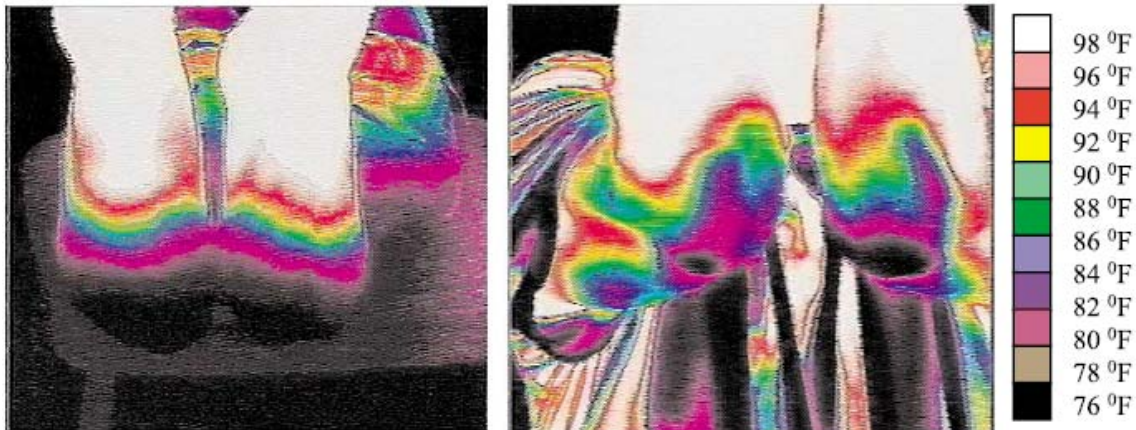


Figura 1.8 – Variação de temperatura dos dedos dos pés e dos cotovelos de um paciente com hanseníase (Gunapala *et al*, 2000).

c) Aplicações militares

Não é necessário explicar o quão importante é a tecnologia de imageamento IR em tempo real para vigilância, reconhecimento, e operações militares. Uma câmera QWIP foi usada pelos pesquisadores da BMDO (*Ballistic Missile Defense Organization* - USA) em um experimento único para discriminar e claramente identificar o veículo de lançamento a partir do jato de gases quentes emanado dos motores do foguete.

Normalmente, a temperatura de veículos de lançamento é de aproximadamente 250°C, enquanto que a temperatura do jato de gases quentes emanando do mesmo pode atingir 950°C. De acordo com a teoria de Planck de emissão do corpo negro, a razão entre o fluxo de fótons de dois corpos negros a 250 e 950°C em 4µm é de 25.000, enquanto que a mesma razão entre o fluxo de fótons em 8,5µm é de 115, conforme ilustrado na figura 1.9. Para se obter um melhor contraste na imagem, é interessante explorar a faixa de comprimentos de onda em torno de 4µm. A figura 1.10 mostra uma imagem do veículo de lançamento Delta-II obtida com a câmera QWIP.

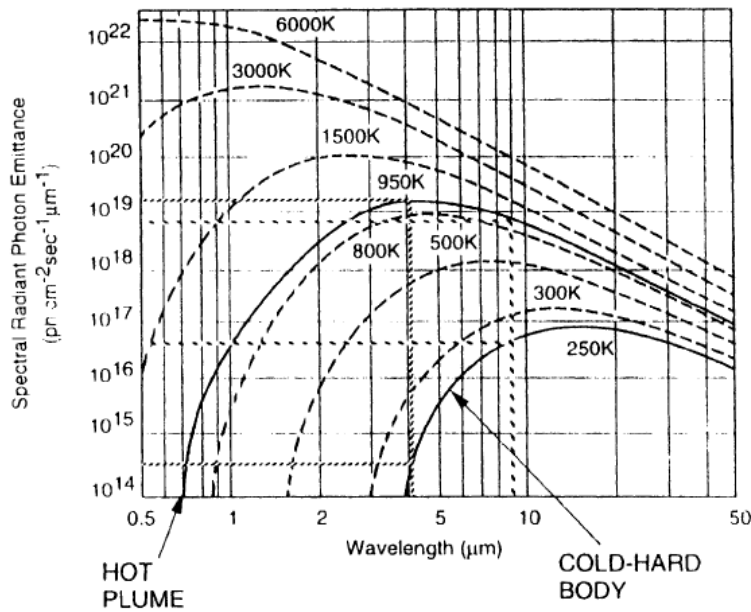


Figura 1.9 – Espectro de emissão do corpo negro para várias temperaturas.

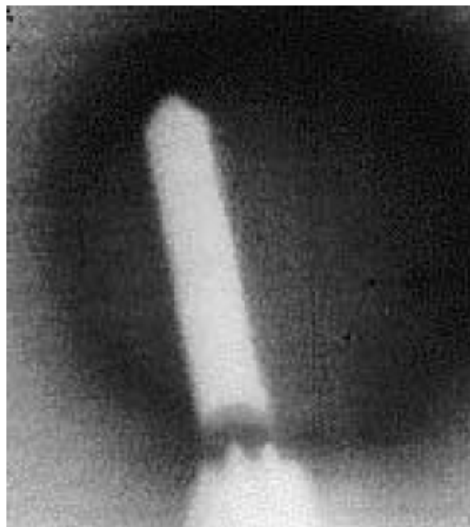


Figura 1.10 – Imagem do míssil Delta-II obtida por uma câmera QWIP durante o lançamento (Gunapala *et al*, 2000).

d) Astronomia

O JPL (*Jet Propulsion Laboratory* – NASA – USA) começou em 2001 o desenvolvimento de uma câmera de IR multi-espectral (denominada QWIPCPIC) para realizar observações astronômicas no telescópio Palomar de 5m de diâmetro. Essa câmera foi projetada para acomodar até três FPAs de QWIPs: um de 256x256 pixels em 8,5 μ m, um de 640x512 pixels em 12,5 μ m, e um de 10,3 μ m

que ainda está em fase de desenvolvimento. A figura 1.11 apresenta um arranjo esquemático do instrumento. Essa configuração permitirá o imageamento simultâneo em três cores.

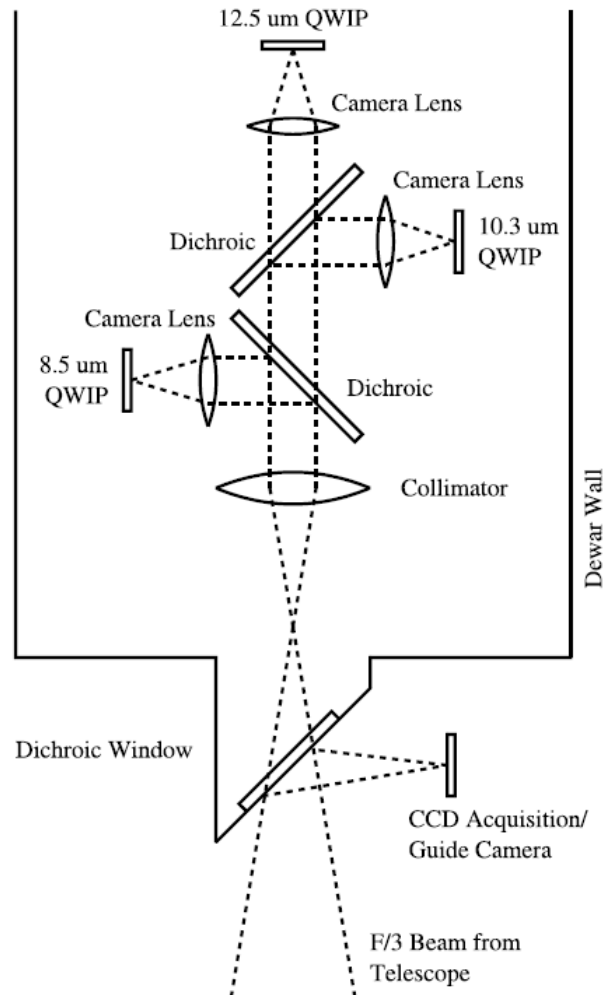
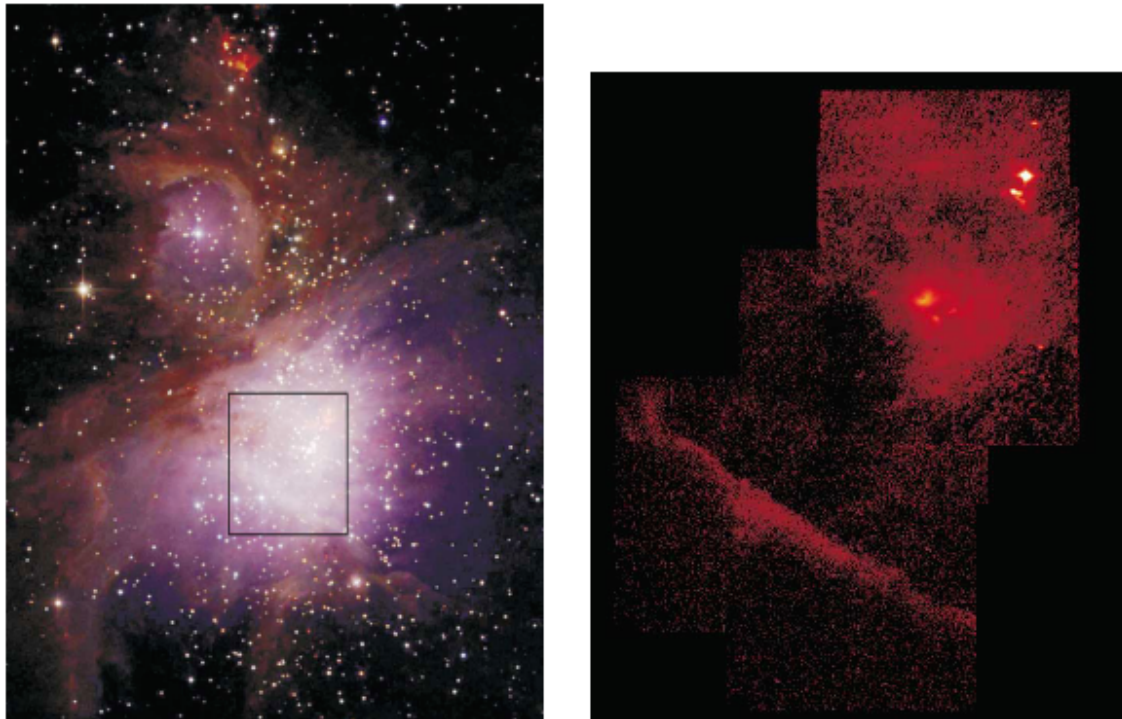


Figura 1.11 – Esquema interno da câmera QWICPIC.

As principais vantagens dos QWIPs em relação às câmeras IR típicas em astronomia, baseadas em detectores tipo IBC (*Impurity band Conductor*) de Si:As, são o baixíssimo ruído $1/f$, a operação em temperatura mais alta, e a facilidade de acomodação sobre os multiplexadores CMOS existentes no mercado, possuindo uma boa compatibilidade quanto à expansão térmica. (Ressler *et al*, 2001) As desvantagens são a largura de banda de detecção mais estreita (menos de 50% da largura dos detectores IBC de Si:As, que é de 5-28 μ m), o que pode ser minimizado no caso da utilização de dispositivos multi-espectrais, e a eficiência quântica mais baixa (cerca de 20-30%, contra 70-80% para detectores IBC de

Si:As), associada com a regra de seleção de absorção zero para incidência normal. A eficiência quântica dos QWIPs pode ser melhorada por meio do uso de grades de difração para acoplamento óptico e da aplicação de camadas anti-refletoras sobre a superfície dos detectores. A figura 1.12 apresenta uma imagem no IR médio da galáxia Orion, ao lado de uma imagem em $8,5\mu\text{m}$, feita pela câmera QWICPIC, da porção central da galáxia.



2MASS 1.2–2.2 μm color composite image

QWICPIC 8.5 μm image

Figura 1.12 – Imagens no IR próximo e médio da galáxia de Orion. A região coberta pela imagem QWICPIC está indicada pelo quadrado na imagem do IR próximo (Ressler *et al*, 2001).

1.2. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No capítulo 1 foi apresentada uma introdução ao assunto, incluindo um breve histórico e a descrição de algumas aplicações interessantes.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão teórica, abrangendo os princípios físicos relacionados à radiação do corpo negro e transferência de fluxo, sinal e ruído em fotodetectores, teoria de poços quânticos e estruturas MQW e tecnologia

de QWIPs de GaAs/AlGaAs, encerrando com uma descrição dos sistemas típicos de imageamento IR.

O capítulo 3 relata o procedimento experimental, reunindo a descrição das etapas de processamento e das diversas técnicas envolvidas tanto na confecção quanto na caracterização dos fotodetectores desenvolvidos.

O capítulo 4 engloba os resultados experimentais, obtidos a partir das técnicas empregadas na confecção e na caracterização das amostras, e a discussão dos mesmos. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas ao final dos trabalhos, além de sugestões para trabalhos futuros.