



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**Purificação do brometo de tálio pelo refino zonal e análise da
segregação das impurezas**

JÚLIO BATISTA RODRIGUES DA SILVA

MONOGRAFIA APRESENTADA AO
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS, CAMPUS DE
BOTUCATU, PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE BACHAREL EM FÍSICA MÉDICA

BOTUCATU - SP

2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**Purificação do brometo de tálio pelo refino zonal e análise da
segregação das impurezas**

JÚLIO BATISTA RODRIGUES DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Rezende
Co-orientadora: Prof^a Dr^a. Margarida Mizue Hamada

MONOGRAFIA APRESENTADA AO
INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS, CAMPUS DE
BOTUCATU, PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE BACHAREL EM FÍSICA MÉDICA

BOTUCATU - SP

2012

Instituto de Biociências – Gabinete do Diretor
Distrito de Rubião Júnior, s/n CEP 18618-000 Botucatu - São Paulo - Brasil
Tel Fax 14 3815 2838 Tel 14 3811 6160 diretor@ibb.unesp.br

Ficha catalográfica

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família por me prover de todo o amor e incentivo, combustível sem o qual jamais teria realizado este trabalho. Em especial meus pais, Júlio e Ana. Meus irmãos, Márcio, Fábio, Cíntia e Túlio pelo companheirismo gerado pelos desafios que passamos juntos. Mesmo distantes sempre permanecemos unidos.

Ao meu supervisor o Professor Doutor do Departamento de Física e Biofísica da Unesp Campus Botucatu Marcos Antônio de Rezende, por toda a paciência e compreensão, meus sinceros agradecimentos.

A minha orientadora a pesquisadora e Professora Doutora do Centro de Tecnologia das Radiações do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) pela oportunidade de fazer parte de seu grupo de trabalho e por toda sua atenção, dedicação e paciência comigo, minha eterna gratidão.

Ao IPEN e todas as pessoas que trabalham neste grande instituto, o qual tenho orgulho de fazer parte. Em especial a Robinson Alves do Santos, Diego Vergarças, João, Rodrigo Kirita, Cauê e Fábio. Pelo apoio, companheirismo e paciência.

A República Bagudos e todos seus integrantes e agregados, em especial: André Próspero, Fabio Perez, Fernando Bacchim, Guilherme Giacomini, Gustavo Morlin Moretto, Bruno Brenga, Guilherme Martelini, Nilo Martin, Marcos Calabresi, Tiago Batista, Fábio Mattos, Marcelo Veloso, Eduardo Gonnelli, Régis Ayres, Laura Olaia e Laís Dário, Daniel Guilherme, Guilherme Biliasi, Igor Caroco, Caio Quini, Ronaldo Matos e Júlio Martins. Por toda a amizade.

Ao Professor Doutor José Ricardo de Arruda Miranda e todo o grupo do laboratório de Biomagnetismo do Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências da Unesp Campus Botucatu pelas oportunidades e pelo aprendizado que obtive fazendo parte deste grupo.

A Elisa Ito Kawahara pela atenção, companheirismo e carinho.

E a todas que de alguma forma contribuíram neste trabalho. Obrigado.

“Eu não quero acreditar, eu quero conhecer.”

Carl Sagan

RESUMO

Desde o conhecimento da radiação e seus efeitos a necessidade de mensurá-la intriga os cientistas. Os detectores de radiação mais difundidos atualmente fazem o uso de cristais semicondutores. Porém, esses detectores tem uma temperatura ótima de funcionamento que acaba sendo ultrapassada, já que o processo gera calor. Por isso, o resfriamento acaba sendo uma necessidade.

O desenvolvimento de detectores de radiação com cristal semicondutor que opere a temperatura ambiente é tema de muitos estudos, já que evitaria o processo de resfriamento, trabalhoso e de alto custo.

No Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) o sal de Brometo de Tálcio (TlBr) é estudado para esta finalidade.

Até ser um cristal semicondutor este sal deve passar por vários processos, entre eles o de purificação e o de cristalização. A técnica utilizada para purificar este cristal é a de Refino zonal. Após ser purificado por esta técnica o sal estará apto a ser cristalizado e conseqüentemente integrar um equipamento de detecção de radiação.

Portanto, esta monografia teve como objetivo realizar a análise da segregação das impurezas do sal de TlBr através da técnica de espectroscopia de massa em fonte de plasma induzido (ICP-MS) e espectroscopia de emissão atômica (ICP-AES). Determinando assim se o mesmo está apto a ser cristalizado e vir a compor um detector de radiação.

SUMÁRIO

RESUMO

1 – INTRODUÇÃO.....	7
2 – OBJETIVO.....	9
3 – METODOLOGIA.....	9
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
5 – CONCLUSÃO.....	15

1 – INTRODUÇÃO

A grande maioria dos detectores semicondutores de radiação em freqüente uso é fabricada a partir de matrizes de silício e germânio. A popularidade destes materiais é atribuída à excelente propriedade de transporte de carga, o qual permite o uso de grandes cristais sem excessiva perda de portadores de carga devido à armadilhamento ou recombinação. Atualmente, além do Si e Ge utilizados como detectores de radiação, existe outro semicondutor também disponível comercialmente – CdTe. Destes materiais somente o Si e CdTe podem ser usados à temperatura ambiente. Si é um material semicondutor freqüentemente usado para medidas de raios-X de baixa energia e partículas ionizantes. No entanto, quando são necessárias medidas espectrométricas de alta resolução, o material adequado é o Ge, mas este apresenta o inconveniente de requerer refrigeração para reduzir a corrente de fuga gerada termicamente⁽³⁾. Em aplicações de baixo ruído, como espectroscopia de raios-X, o detector de Si também deve ser refrigerado pela mesma razão. Por outro lado, para aplicações onde é desejada operação à temperatura ambiente, pequenas dimensões e alta sensibilidade são utilizadas o CdTe. A partir do estudo extensivo desses semicondutores, principalmente Si e Ge que apresentam excelentes características espectrométricas, é observado na literatura um considerável interesse no desenvolvimento de outros materiais que apresentam a vantagem de não operar sob refrigeração, tais como: GaAs, HgI₂, PbI₂, CdZnTe e TlBr, para utilização como detectores de radiação. Estes vêm sendo pesquisados para muitas aplicações devido a sua compactidade e desempenho relativamente alto.

Em princípio, um material semicondutor com energia de banda proibida larga (acima de 1,35eV) pode reduzir a corrente de fuga gerada e o seu uso à temperatura ambiente torna-se possível⁽¹⁾. As propriedades necessárias de um detector semicondutor para raios-X e gama operar à temperatura ambiente são: (a) elevado número atômico [Z], (b) larga energia de banda proibida [E_g]: entre 1,35 e 2,7eV e (c) alto produto da mobilidade por tempo de vida [$\mu\tau$], para obter uma completa coleção de cargas, indispensável para boa resolução.

O denominador comum dos materiais semicondutores, que operam à temperatura ambiente, é a dificuldade em crescer cristais com alta perfeição cristalográfica tendo alta pureza química e boa estequiometria. Estes requisitos básicos devem ser satisfeitos em vários

estágios na fabricação do detector. Esse processo envolve a purificação dos materiais iniciais, crescimento do cristal, fabricação do detector, deposição dos eletrodos, montagem sobre um substrato rígido e encapsulação. Cada uma dessas etapas podem introduzir defeitos e deteriorar a resposta nuclear do detector.

Os compostos semicondutores com alto número atômico e energia de banda proibida larga, como CdTe, CdZnTe, HgI₂, PbI₂ e TlBr vêm sendo pesquisados como detectores de radiação e gama, encontrando-se em diferentes estágios de desenvolvimento para alcançar boas resoluções em energia à temperatura ambiente. Destes, o brometo de tálio (TlBr) vem sendo estudado, em particular, por apresentar características superiores ou comparáveis a esses semicondutores, apresentando potencialidade para confecção tanto de detectores de radiação ionizante.

O TlBr tem um número atômico médio alto ($Z_{\text{Tl}}=81$ e $Z_{\text{Br}}=35$), alta densidade ($7,5\text{g/cm}^3$) e resistividade ($10^{12}\Omega\text{cm}$) e energia de banda proibida de $2,7\text{eV}$. Cristaliza em uma estrutura cristalina cúbica e funde congruentemente à 480°C . Apresenta baixo ruído e alta resolução para raios-X e gama⁽⁴⁾. A energia da banda proibida relativamente larga indica que o detector TlBr pode operar em temperatura ambiente com baixa corrente de fuga⁽⁴⁾ e baixo ruído eletrônico^(5,10).

Uma das aparentes desvantagens do TlBr são a baixa mobilidade dos portadores de cargas, $6\text{ cm}^2/\text{Vs}$ para elétrons e $2\text{cm}^2/\text{Vs}$ para lacunas para o TlBr⁽⁴⁾. Entretanto, o transporte de cargas é regido em função da mobilidade pelo produto do tempo de armadilhamento ($\mu\tau$), podendo ser suficientemente grande para materiais de alta pureza e perfeição cristalina^(4,8). Isto pode ser alcançado com prévia purificação dos sais por refinamento zonal antes do crescimento dos cristais.

Na literatura observa-se um crescente interesse no desenvolvimento de detectores de radiação de TlBr. As dificuldades relacionadas com a purificação, o crescimento e sua caracterização destes cristais são ainda objetos de estudo em diversos centros de pesquisa. Por meio de um trabalho de doutorado, uma metodologia de purificação e crescimento do cristal de TlBr foi desenvolvida em nossos laboratórios. Os resultados obtidos com a purificação prévia do material tem sido bastante satisfatórios e os cristais crescidos por Bridgman apresentaram boa qualidade cristalina. No entanto, os cristais de TlBr desenvolvidos nos

nossos laboratórios apresentaram características adequadas para aplicações onde não requerem alta resolução e o uso contínuo de operação do detector. A instabilidade, ou seja, a degradação gradual dos detectores que ocorre em um período de diversas horas após a aplicação da tensão foi observados nos nossos detectores.

Diversos estudos sobre a preparação do detector de TlBr vem sendo realizados e progressos tem sido alcançados nos métodos de purificação de crescimento. Existe um consenso na literatura que a pureza do cristal de TlBr é um fator crucial no seu desempenho como um detector de radiação. No entanto, poucos trabalhos referente ao reducao de impurezas no cristal de TlBr são encontrados na literatura. Neste trabalho sal de TlBr será purificado pela técnica de refino zonal e avaliado a sua eficiência de purificação e estimar o coeficiente de segregação, k , das impurezas no lingote de TlBr.

2 - OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a purificação de TlBr por refino zonal e estimar o coeficiente de segregação, das impurezas no lingote de TlBr. As concentrações das impurezas serão determinadas por meio da técnica de espectroscopia de massa em fonte de plasma induzido (ICP-MS) e espectroscopia de emissão atômica (ICP-AES).

3- METODOLOGIA

Os métodos que utilizam o processo de fusão por zona para a purificação de materiais baseiam-se no fenômeno de segregação ou distribuição de impurezas em materiais cristalinos, sendo o refinamento zonal o mais utilizado⁽²⁸⁾.

O processo de refinamento zonal foi inicialmente empregado como método de crescimento de cristais. Em 1952, Pfann⁽²⁹⁾ verificou a grande eficiência desta técnica para redução de concentrações de impurezas em materiais. Esta técnica é baseada na segregação de impurezas, devido à diferença de solubilidade das mesmas no sólido e líquido. Este método evidenciou-se como uma ferramenta poderosa para a manipulação de impurezas em cristais, podendo ser aplicada não apenas para purificação de materiais, mas, também, para a distribuição uniforme e controlada de uma impureza particular em um monocristal⁽³⁰⁾.

Diferentemente de outras técnicas de crescimento a partir da fusão, como os métodos de Bridgman e Czochralski, onde o material é todo fundido e em seguida recristalizado (solidificação normal), no processo de refinamento zonal o sólido é fundido e solidificado por regiões ou zonas. Uma pequena fração do comprimento total do lingote é fundido, gerando uma (ou mais) zonas fundidas, através da passagem de uma estreita zona quente ao longo da seção reta transversal do lingote (Figura 1).

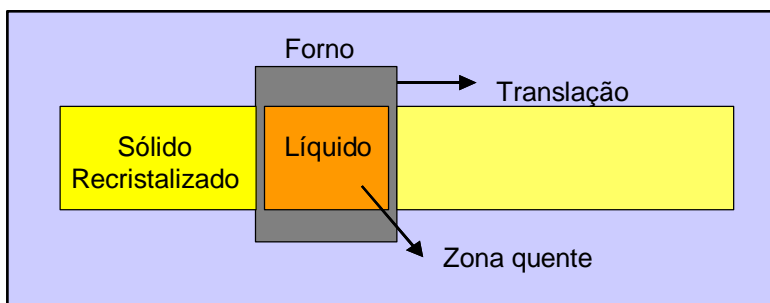


Figura 1 – Diagrama esquemático do processo de refinamento zonal

A zona fundida pode ser passada repetidamente através do material, acarretando um efeito de purificação superior ao observado em processos de solidificação normal⁽³⁰⁾. Desta forma, a eficiência do processo de purificação depende do número de passagens da zona fundida através do lingote de material, isto é, uma purificação muito maior será obtida repetindo-se o processo de fusão por zona várias vezes. No caso da solidificação normal, teoricamente, também poderia ser obtida maior purificação pela repetição do processo. Para isso, a parte do lingote em que a impureza se concentrou seria retirada e repetir-se-ia o processo para a parte purificada. Na prática, contudo, este procedimento envolveria o manuseio do material e, muito provavelmente, a introdução de contaminantes no mesmo^(30,31).

A remoção de impurezas no processo de fusão por zona é dependente do coeficiente de segregação⁽²⁹⁾. O valor do coeficiente de segregação efetivo (k) para determinada impureza será menor do que a unidade quando a concentração desse soluto no

sólido for menor do que a sua concentração na fase líquida. Neste caso, a região inicial do material solidificado será mais pura, porque o soluto será rejeitado pelo sólido e se acumulará no líquido. Por outro lado, o coeficiente de segregação será maior do que a unidade quando a concentração do soluto no sólido for maior do que a concentração do soluto na fase líquida. Inversamente, a região final do material solidificado, será mais pura. Para k igual a 1, a impureza se distribuirá uniformemente ao longo do lingote^(29,32).

No processo de purificação por refinamento zonal, como em qualquer outro experimento, é necessário racionar o tempo e reduzir os custos envolvidos na obtenção de materiais com alto grau de pureza. Desta forma é importante considerar o comprimento da zona de fusão do forno de purificação. Na determinação do uso de uma zona de fusão, estreita ou larga, deve ser observado que a utilização de zonas largas permite uma purificação prévia mais rápida. Entretanto, na seqüência do processo haverá maior perda no gradiente de concentração de impurezas. Isto porque estas serão diluídas num maior volume de material fundido tornando o processo de purificação menos eficiente. Assim, a eficiência do processo de purificação aumenta com o decréscimo da largura da zona de fusão l , pois a utilização de zonas de fusão estreitas fornece melhores resultados na concentração de impurezas na distribuição limite⁽⁶⁾. O comprimento de zona mais freqüentemente utilizado varia entre 1/10 e 1/20 do comprimento da amostra⁽³¹⁾.

Expressando o comprimento total do lingote L como múltiplo m do comprimento da zona l , isto é:

$$m = \frac{L}{l} \quad (1)$$

é observado que, quanto maior for o valor m , maior será o número de passos n , necessários para atingir a distribuição limite. Quando $n = m$, cada passo sucessivo adicional resulta numa menor eficiência de purificação. Na prática, recomenda-se valores de $L/l \geq 6$.

Um outro parâmetro experimental que também pode ser alterado para otimização do processo é a velocidade de deslocamento, V , da zona de fusão (ou da interface). Altos valores de velocidade permitem que sejam utilizados maiores números de passos, n , da zona de fusão

por unidade de tempo. Por outro lado, baixos valores de velocidade são mais eficientes no processo de purificação. A taxa ótima para eficiência do refinamento zonal está entre 0,5 e 15 cm/h⁽³¹⁾. A condição de máxima purificação no menor tempo possível, para um dado valor de k , é dado quando a razão n/V assume o seu valor mais baixo^(29,31).

Neste trabalho, sais de TlBr com diferentes graus de pureza e procedência, variando de 99,0 a 99,999% serão utilizados como matéria-prima. Os cristais serão purificados por refinamento zonal.

O processo de purificação do sal de TlBr será realizado utilizando o forno de refinamento zonal. A técnica de refinamento zonal consiste em fundir parte do material e ao mesmo tempo realizar uma translação da região fundida por toda sua extensão, segregando as impurezas presentes para as extremidades. Durante a solidificação de um lingote do material, as impurezas são rejeitadas pelo sólido em crescimento e acumuladas no líquido. Em sucessivos passos de purificação, utilizando o forno de refinamento zonal, a concentração de impurezas no início do lingote decrescerá continuamente com o acúmulo de impurezas na região inicial ou final do mesmo, conforme o coeficiente de segregação de cada impureza. O grau de pureza do material dependerá, desta forma, do número de passos do mesmo pela zona fundida. A purificação inicialmente consistirá no carregamento das ampolas de quartzo, com os sais de TlBr comerciais. Os tubos serão selados à vácuo e será estudada a melhor temperatura (acima do ponto de fusão de 480°C do TlBr) a ser utilizada nesse forno em todo o processo de purificação. O forno de refinamento zonal é acoplado a um sistema de suporte e translação linear com motor de passo, para permitir o deslocamento horizontal do forno durante a purificação do sal a uma velocidade controlada. A faixa de operação da velocidade do forno pode variar de 0,1cm/h a 3600cm/h. Será estudada qual a velocidade ideal do forno, bem como a quantidade de passos necessários para redução da concentração de impurezas presentes no material; com o intuito de alcançar a melhor eficiência na purificação a ser realizada no sal de TlBr.

As impurezas químicas presentes nos sais comerciais de TlBr e também dos lingotes purificados por refinamento zonal serão determinadas fazendo-se uma varredura pela técnica de espectroscopia de massa em fonte de plasma induzido (ICP-MS) e espectroscopia de emissão atômica (ICP-AES). O coeficiente de segregação será calculado por meio de cálculo de segregação convencional [9,19].

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a purificação, o lingote de TlBr apresentou, visualmente, uma maior concentração de impurezas na região final, devido a coloração mais escura. O restante do lingote apresentou coloração amarelo-brilhante e transparente. Para confirmação dessa observação, duas amostras do material purificado foram analisadas para avaliação de concentração de impurezas utilizando a técnica de ICP-MS. Não há relatos na literatura sobre quaisquer análises realizadas para identificação e avaliação da concentração e redução das impurezas presentes nos cristais de TlBr utilizados para sua preparação como detector de radiação.

A Figura 2 ilustra o resultado para duas regiões (central e final) do lingote purificado com 20 passos de refinamento zonal, denominado RZ20.

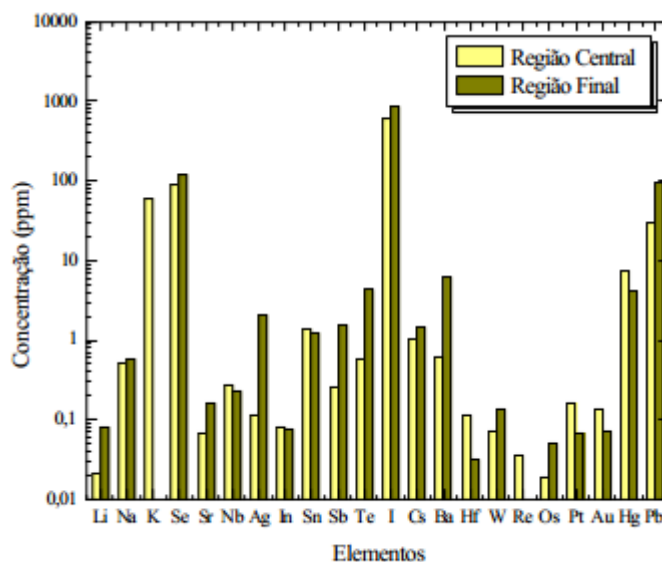


Figura 2: Análise de concentração de impurezas (em ppm) no lingote purificado em RZ20.

É verificado nessa Figura que o lingote RZ20 apresenta na sua região central uma concentração um pouco maior dos elementos In, Sn, Hf, Pt, Au e Hg do que na região final. O resultado obtido para os outros elementos, principalmente Li, Sr, Ag, Sb, Te, Ba e Pb, está dentro do esperado, em que a maioria das impurezas tendem a se depositar na parte final do lingote cristalino, de acordo com o coeficiente de segregação de impurezas. Para o elemento k é observado que não foi detectado na região final do lingote. Os resultados obtidos por ICP, embora preliminares, possibilitaram determinar quali e quantitativamente as impurezas presentes no TlBr após os processos de fusão. Pôde ainda ser observada a sensibilidade dessa técnica, pela grande quantidade de elementos quantificados nas amostras.

Deve-se ressaltar que a presença desses elementos está sendo relatada pela primeira vez neste trabalho. Estudos estão sendo realizados para o aprimoramento da metodologia de avaliação das impurezas no TlBr, visando estabelecer o número de passos adequados para a redução máxima da concentração de impurezas de forma a se obter detectores de radiação com qualidade. Análises posteriores deverão ser realizadas para comparação de lingotes purificados com diferentes velocidades e também dos materiais de partida para verificação da redução de impurezas após os diferentes passos de purificação.

5 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi validada a eficácia da técnica de purificação dos sais de TlBr por refinamento zonal, bem como a metodologia para avaliação da redução das impurezas traços nos cristais. A análise por ICP-MS mostrou ser uma técnica eficiente para identificar e quantificar o teor das impurezas no TlBr.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mcgregor, D.S.; Hermon, H., Room-Temperature Compound Semiconductor Radiation Detectors. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.*, v.A395, p.101-124, 1997.
2. Lund, J.C.; Olschner, F.; Burger, A. IN: T.E. Schlesinger, R.B. James (Eds.). *Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications, Semiconductors and Semimetals*, vol. 43, San Diego: Academic Press, 1995.
3. Hitomi, K.; Matsumoto, M.; et al. Characterization of thallium bromide crystals for radiation detector applications. *Journal Crystal Growth*, v.225, p. 129-133, 2001.
4. Hitomi, K; Muroi, O.; et al. Recent progress in thallium bromide detectors for X- and γ -ray spectroscopy. *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.*, v.A458, p.365-369, 2001.
5. Shah, K.S.; Lund, J.C.; Olschner, F.; Moy, L.; Squillante, M.R., Thallium Bromide Radiation Detectors. *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, v.36, p. 199-202, 1989.
6. Costa, F. E.; Rela, P. R.; Oliveira, I. B.; Pereira, M.C.C.; Hamada, M.M. “ Surgical Gamma Probe with TlBr Detector Semiconductor for Identification of Sentinel Lymph Node”, ”, *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 53, pp. 1403-1407, 2006.
7. Oliveira , I.B.; Costa, F.E. .Armerlin, M.J. and Hamada, M.M., Purification and Growth of PbI_2 Crystals. Dependence of the Radiation Response on the PbI_2 Crystal Purity. *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, vol. 49(4) , pp. 1968-73, 2002.
8. Munirathnam, N.R., Prasad, D.S. Stuheer, Ch. And Prakash, T.L., Purification of tellurium to $6N^+$ by quadruple zone refining. *Journal Crystal Growth*, v.254, p. 262-55, 2003.
9. Pfann, W.G., *Zone Melting*. New York, N.Y.: John Wiley, 1958.
10. Kishi, Y. and Kawabata, K., *Effect of Plasma Parameters on the Analysis of Semiconductor Process Chemicals by ICP-MS* (2003). Available: <http://www.perkinelmer.com>.
11. M.S. Kouznetsov, I.S. Lisitsky, S.I. Zanoloka, V.V. Gostilo, “Development of the technology for growing TlBr detector crystals,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol.531, pp.174-180, 2004.
12. M.R. Squillante and K Shah, Semiconductors for room temperature nuclear detector applications, *Semiconductors and Semimetals*, v.43. T.E. Schlesinger and R.B. James Ed., Academic Press, 1995, p.475.

13. T. Onodera, K. Hitomi, T. Shoji, Y. Hiratate, "Pixellated thallium bromide detectors for gamma-ray spectroscopy and imaging," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol.525, pp.199-204, 2004.
14. V. Gostilo, D. Gryaznov, I. Lisjutin, "Technological limitations and processing-generated defects at the development of pixel and strip arrays," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol.487, pp.13-18, 2002.
15. P. Sellin, "Recent advances in compound semiconductor radiation detectors," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, vol.513, pp.332-339, 2003.
16. K. HITOMI, T. SHOJI, NIIZEKI, Y."A METHOD FOR SUPPRESSING POLARIZATION PHENOMENA IN TLBR DETECTORS" *NUCL. INSTRUM. METHODS PHYS. RES. A*, VOL.585, PP.102-104, 2008.
17. Vieira, C.L.; Costa, F.E., Hamada, M.M. "Effect of etching on the TlBr crystal surface and its radiation response", International Nuclear Atlantic Conference, VIII ENAN, September, Santos, Brazil, 2007.
18. K. HITOMI, ONODERA, TOSHIYUKI; T. SHOJI, ZHONG, HE, "PIXELLATED TLBR DETECTORS WITH THE DEPTH SENSING TECHNIQUE" *NUCL. INSTRUM. METHODS PHYS. RES. A*, VOL.578, PP.235-238, 2007.
19. C. H. MESQUITA, I. B. OLIVEIRA, J. F. D. CHUBACI, M. M. HAMADA, "MULTIELEMENTAR SEGREGATION COEFFICIENT OF THALLIUM BROMIDE IMPURITIES FROM INDUCTIVELY COUPLED PLASMA MASS SPECTROSCOPY MEASUREMENTS" IN: 2003 IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM, 2003.