

ESTADO DA ARTE EM DOSIMETRIA DO ESTADO SÓLIDO

Susana O. Souza¹, Takayoshi Yamamoto^{2,3}, Francesco d'Errico^{1,4,5}

¹ Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Física
Av. Marechal Rondon, s/n – Jd. Rosa Elze
50740-540 São Cristóvão, BraSil
sosouza@ufs.br

² Radioisotope Research Center, Osaka University
2-4, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

³ Oarai Research Center, Chiyoda Technol Corporation
3681, Narita-cho, Oarai-machi, Higashi-ibaraki-gun, Ibaraki-ken, 311-1313, Japan

⁴ Università degli Studi di Pisa, Scuola di Ingegneria,
Largo Lazzarino 1, I-56126 Pisa, Italy

⁵ Yale University, School of Medicine
333 Cedar St, New Haven, CT 06510, USA
francesco.derrico@yale.edu

RESUMO

Detectores de estado sólido passivos ainda dominam o campo de dosimetria pessoal. Este artigo fornece o estado da arte desse campo e resume alguns dos mais recentes trabalhos apresentados sobre TL, OSL e RPL durante a 17th International Conference on Solid State Dosimetry, realizada em Recife em setembro de 2013. O artigo compreende em particular as técnicas de Termoluminescência (TL), Luminescência Opticamente Estimulada (OSL), Radiofotoluminescência (RPL). A termoluminescência tem como maior vantagem a grande disponibilidade de materiais comerciais para dosimetria, e a natureza tecido-equivalente de vários destes materiais. Como limitação, a dosimetria TL apresenta desvanecimento do sinal luminescente e a necessidade de altas temperaturas para obtenção do sinal. A Luminescência Opticamente Estimulada apresenta como vantagens a sua alta sensibilidade, a possibilidade de leitura múltipla, ao passo que o seu limite está na necessidade de usar filtros de compensação da resposta, além do alto custo dos equipamentos e dosímetros que ainda se restringem pouquíssimas opções comerciais. A Radiofotoluminescência tem uma leitura que é totalmente não-destrutiva, mas seus dosímetros apresentam falta de tecido-equivalência e um custo elevado. São apresentados os detalhes das técnicas e serão discutidas as vantagens e limites de cada uma delas.

1. INTRODUÇÃO

Detectores de estado sólido passivos ainda dominam o campo de dosimetria pessoal, principalmente graças ao seu baixo custo, alta confiabilidade e rendimento elevado. No entanto, o recente aparecimento no mercado de vários dosímetros eletrônicos pessoais representa um desafio para o uso exclusivo dos sistemas passivos para dosimetria feita por

laboratórios primários ou acreditados. Este cenário motiva atividades de pesquisa e desenvolvimento sobre dosímetros passivos para sistemas que oferecem maior precisão de resposta e limites de detecção mais baixos. A situação atual também está estimulando uma aceleração no desenvolvimento de normas internacionais sobre os requisitos de desempenho e de teste para sistemas de dosimetria passiva, o que pode acelerar significativamente a implementação de técnicas de serviços de dosimetria pessoal comerciais.

Dentre os detectores de estado sólido passivos, materiais luminescentes são ainda os mais vastamente usados na proteção radiológica pessoal, ambiental, médica e dosimetria espacial. Estes materiais tem *gap* largo, são isolantes, compostos cristalinos com níveis de defeitos apropriados introduzidos dentro de seu *gap* por impurezas ou imperfeições cristalinas. A exposição à radiação ionizante cria elétrons livres e buracos nestes materiais, e essas cargas livres podem ficar presas nos níveis de defeitos. A população de portadores de cargas presos pode ser retida, à temperatura ambiente, desde poucos segundos até vários de anos, dependendo da profundidade do nível de defeito. Assim, as informações relacionadas com a exposição à radiação, ou seja, a concentração de cargas aprisionadas, pode permanecer registrada no cristal nesses níveis mais estáveis até a leitura. A leitura desta informação é efetuada através da estimulação do detector, isto é, fornecendo energia suficiente para que estas cargas aprisionadas escapem, após o que podem recombinar-se e emitir luz. Em termoluminescência (TL), as cargas aprisionadas são estimuladas por aquecimento dos detectores; em luminescência opticamente estimulada (OSL) os detectores são iluminados com luz visível. Finalmente, em radiofotoluminescência utilizam-se raios UV para estimular a emissão de luz.

2. LUMINESCÊNCIA TERMICAMENTE ESTIMULADA

Historicamente, a utilização da estimulação térmica tem sido o método de leitura predominante durante várias décadas. De fato, a medição da dose absorvida pela radiação ionizante de baixo LET (*linear energy transfer*) através de termoluminescência é simples e capaz de medições reproduzíveis. Uma grande variedade de materiais TL está disponível comercialmente, os mais populares são baseados em LiF. Em particular, o LiF:Mg,Cu,P permite a medição a níveis de doses extremamente baixos de radiação gama de ^{137}Cs mesmo de 1 μGy [1]. Em doses mais elevadas, uma precisão de 1% ou mais em medidas repetidas pode ser alcançada usando diversos materiais TL. O método mais simples de análise envolve a integração da curva de emissão, isto é, a intensidade do sinal em função da temperatura da amostra em um intervalo pré-determinado de temperaturas. Isso produz um único número que pode ser calibrado para avaliar a dose após a aplicação de algoritmos e fatores de correção [2]. O método mais complexo envolve deconvolução computadorizada da curva de emissão, que separa da curva os seus picos de emissão componentes acoplados juntamente com estimativas analíticas do fundo. Este último método pode proporcionar informações importantes sobre várias questões, melhorar significativamente a dose mínima mensurável e a reprodutibilidade, bem como reduzir a complexidade do protocolo de medição.

É de conhecimento comum dentre os usuários de dosimetria que o processo de leitura dos dosímetros termoluminescentes é destrutivo. O argumento é que uma vez que um detector é aquecido a uma temperatura máxima de leitura, as armadilhas de elétrons são esvaziadas, e a informação sobre a dose é apagada. Enquanto o esvaziamento das armadilhas é visto principalmente como uma vantagem para garantir que o próximo usuário não carregue a dose

residual do usuário anterior, esta é citada como uma desvantagem da termoluminescência, quando comparado com OSL e a RPL. Em muitos materiais TL, contudo, há armadilhas profundas de alta temperatura que são preenchidos com os elétrons durante a irradiação, mas não são esvaziados durante a leitura. Uma forma de recuperar a informação sobre a dose a partir dessas armadilhas profundas é expor o dosímetro lido anteriormente a uma fonte de luz ultravioleta. A luz transfere os elétrons das armadilhas profundas para as rasas, as armadilhas dosimétricas, e o resultado é que a medição TL pode ser refeita várias vezes. Este efeito é chamado de termoluminescência fototransferida (PTTL). Esta técnica foi aplicada com sucesso em LiF:Mg,Ti, no entanto, houve apenas algumas tentativas de aplicá-la no LiF:Mg,Cu,P [3-5].

Recentemente, foi relatado o sucesso na aplicação desta técnica para o LiF:Mg,Cu,P (TLD-700H) da Harshaw [6]. Cartões TLD comerciais da Harshaw foram usados para este estudo e expostos a doses entre 0,1 Gy a 10 Gy de raios beta e raios X de baixa energia. O estudo demonstrou que, com uma escolha adequada dos parâmetros de leitura TL e das condições de irradiação de luz UV, doses que são relevantes para dosimetria pessoal ou ambiental podem ser re-estimadas.

Um aspecto importante desta técnica é a otimização tanto do comprimento de onda da luz UV quanto da duração da exposição à radiação UV. O comprimento de onda de 254 nm foi escolhido por ter sido aplicado com êxito para o LiF: Mg, Ti e porque é facilmente disponível como fonte de luz em dispositivos, tais como um sistema eletrônico que utiliza radiação UV para apagar memórias tipo EPROM (*Erasable Programmable Read-Only Memory*). O tempo de exposição UV foi cuidadosamente investigado [6]. A eficiência relativa PTTL (PTTL/TL) como uma função do tempo de exposição à radiação UV é de aproximadamente 1% para curtos tempos de exposição, mas aumenta para um valor entre 6 e 8%, para tempos de irradiação no intervalo de 1 a 2 horas. Portanto, a fim de obter eficiências elevadas PTTL, são necessárias exposições prolongadas e/ou intensas.

As curvas de emissão típicas logo após a exposição à radiação inicial de 0,5 mGy e o sinal PTTL resultante foram comparados com a curva de emissão de um dosímetro de controle sem história de radiação que foi exposto à luz UV sob condições experimentais idênticas. Mesmo a este nível de dose baixa, o sinal PTTL é distinguível daquele do controle. Além disso, as curvas TL e a emissão PTTL têm formas e posições de pico semelhantes, o que confirma que as curvas observadas estão associados com PTTL.

A intensidade do sinal PTTL é aproximadamente 6% do sinal TL original, e a eficiência é independente da dose no intervalo de 0,2 mGy a 1 Gy, o que implica que um único fator de conversão pode ser aplicado aos dados PTTL para efeitos de re-estimativa da dose. Para níveis de dose mais baixos, no intervalo de 0,1-0,2 mGy onde os dosímetros e a leitura de fundo não são negligenciáveis em comparação com o sinal PTTL, a re-avaliação da dose pode ser realizada utilizando a caracterização e a calibração adequadas do sistema. Esta caracterização pode envolver medição cuidadosa do sinal PTTL neste intervalo de doses, e a aplicação de um fator de correção "dose-dependente". Esta técnica não é limitada a uma única re-estimativa. A exposição repetida à luz UV seguida de leitura TL pode re-estimar a dose diversas vezes. É claro que o número de possíveis avaliações repetidas deverá ser dependente da dose, aumentando com a mesma. Níveis de doses tão baixas quanto 0,2 mGy podem ser re-avaliados sem a necessidade de calibração especial além da aplicação de um único fator de correção numérica. Os futuros sistemas TLDs podem incorporar essa capacidade como uma função automática usando fonte de UV embutida ao leitor.

Novos materiais extremamente sensíveis a radiação gama ou a nêutrons térmicos como o MgB₄O₇:Dy ou Li₂B₄O₇:Dy, e que tem sido facilmente sintetizados com técnicas alternativas, de baixo custo e com baixo impacto ambiental, tem sido produzidos com excelentes

resultados para a dosimetria TL [7-9]. Nanopartículas que podem ser incorporadas em diversos materiais ou dosímetros extremamente pequenos podem ainda contribuir com a dosimetria em regiões de grande gradiente de dose, tornando a dosimetria TL ainda uma área extremamente excitante para novas pesquisas.

3. LUMINESCÊNCIA OPTICAMENTE ESTIMULADA

A luminescência opticamente estimulada (OSL) tornou-se uma técnica comercial há 20 anos e agora é usada em dosimetria pessoal, médica e espacial. Enquanto OSL baseia-se no mesmo tipo de materiais e processos (ionização, aprisionamento e recombinação) como a dosimetria TL, são necessários centros de captura com maior secção de choque para fotoionização [10-11]. Na verdade, cargas aprisionadas no LiF:Mg, Ti, o material TL mais comumente utilizado, podem também ser opticamente estimuladas, mas a fotoionização não é favorecida e a dose mínima detectável é elevada [12]. Portanto, dosimetrias TL e OSL são geralmente baseadas em materiais diferentes.

A OSL é geralmente apreciada por causa de sua relativa simplicidade. Não há necessidade de se estabelecer um bom contato térmico entre o material dosímetro e um aquecedor; de fato, não há aquecimento nenhum, e por isso é que os plásticos podem ser usados na fabricação dos dosímetros. Ao eliminar o aquecimento, os efeitos térmicos de “thermal quenching”, que consiste na diminuição da eficiência luminescente com o aumento da temperatura, também são eliminados [13] e alterações na estrutura de defeitos do material devido à difusão térmica [14] são evitadas. O sistema de instrumentação é também simples e são necessários componentes que são fáceis de se integrar como uma fonte de luz, tal como LEDs, laser ou lâmpada filtrada, juntamente com um sensor de luz, normalmente um tubo fotomultiplicador (PMT). No entanto, é necessário impedir que a estimulação luminosa intensa atinja o sensor de luz. Isto pode ser feito utilizando filtros ópticos, mas requer que o comprimento de onda de emissão do detector seja diferente do comprimento de onda de estimulação. Além disso, a luz de estímulo é ordens de magnitude mais intensa do que a luz emitida pelo dosímetro. Portanto, a escolha dos filtros ópticos, do comprimento de onda de estimulação, e do comprimento de onda de detecção são algumas das decisões mais importantes quando da criação de um sistema de leitura pela técnica de OSL.

Embora OSL tenha sido proposta para dosimetria na década de 1950 [15], foi a introdução do óxido de alumínio dopado com carbono ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) no início da década de 1990 [16] que a tornou uma técnica viável. $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ é um material quase ideal para OSL: tem um número atômico efetivo razoável ($Z_{\text{eff}} = 11,3$) [17], um centro de aprisionamento dominante que é estável à temperatura ambiente (associado com um pico a \sim TL 170-200°C) e ainda muito sensível à luz [18], e uma alta concentração de centros de luminescência que emitem a 420 nm, correspondendo assim a resposta espectral dos fotocátodos das PMT [16]. Como consequência, o óxido de alumínio dopado com carbono ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) tornou-se o material padrão em uma ampla gama de aplicações.

Por outro lado, a disponibilidade de materiais adequados para OSL ainda é bastante limitada em comparação com a TL, mas está crescendo gradualmente. Em particular, a adoção do BeO está aumentando, graças à sua alta sensibilidade e número atômico efetivo ($Z_{\text{eff}} = 7,2$) semelhante ao do tecido e da água ($Z_{\text{eff}} = 7,5$) [17].

O óxido de berílio foi reconhecido como um potencial dosímetro OSL décadas atrás [19] e testado para a dosimetria TL [20-21], no entanto, foi apenas na década de 1990 que as investigações foram retomadas [22] e sua adoção como um dosímetro OSL comercial é

bastante recente [23-24]. O material atualmente utilizado para um sistema de dosimetria comercial mostra propriedades, tais como a elevada sensibilidade à radiação ionizante (dose mínima detectável de $\sim 20 \mu\text{Gy}$), dose resposta linear ao longo de seis ordens de grandeza e número atômico efetivo de 7,2.

A dependência energética é caracterizada pela subestimação de fótons de baixa energia especialmente abaixo de 30 keV, onde o efeito de atenuação por plexiglas abrange compostos com efeitos de baixo Z. Relativamente ao desvanecimento, ele ocorre como um efeito de curta duração de alguns pontos percentuais durante os primeiros 5 minutos após a exposição. Depois de algumas horas de armazenagem, o desvanecimento de longo prazo é negligenciável à temperatura ambiente. A temperatura pode causar alterações no sinal OSL, mas essas começam apenas acima de 120 °C. A curva de dose-resposta apresenta um comportamento linear de 10 μGy até alguns Gy, acima do qual ocorre a supralinearidade. A saturação começa com doses de cerca de algumas centenas de grays. Esta resposta permite medidas nos intervalos de doses comuns para dosimetria pessoal, ambiental e médica. Mesmo a medida de altas doses de até algumas centenas de grays é possível com uma calibração específica. O baixo coeficiente de variação leva a medições com baixas incertezas e a ausência de desvanecimento permite medições em períodos mais longos.

Outros materiais que também foram investigados recentemente para dosimetria OSL incluem KCl e MgO. KCl tem um número atômico efetivo Z_{eff} de 18,1, que é menor do que outros fósforos de armazenamento otimizados para geração de imagens (por exemplo, Z_{eff} de BaFBr:Eu é ~ 50) e está sendo investigado para dosimetria 2D em radioterapia [25]. MgO tem um número atômico efetivo $Z_{\text{eff}} = 10,8$ e também tem sido investigado para dosimetria pessoal [26-27] e dosimetria 2D [28].

4. RADIOFOTOLUMINESCÊNCIA

Alguns vidros irradiados com radiação ionizante emitem luz visível quando são excitados pela radiação UV, um fenômeno chamado radiofotoluminescência (RPL). Ao contrário de TL e OSL, na RPL os centros de luminescência não desaparecem depois de serem lidos. A radiofotoluminescência era conhecida desde a década de 1950 [28], quando foi testada para dosimetria de acidente. Na década seguinte, formulações melhoradas de vidro apresentaram maior sensibilidade [30], mas ainda assim foram afetadas por sinais espúrios devido a fotoluminescência em vidro não irradiado e a sujeira em sua superfície. A técnica se tornou realmente viável quando a estimulação UV pulsada foi introduzida para uma discriminação eficaz de ruído [31] e já atingiu a maturidade plena, graças a formulações de vidro avançadas e opto-eletrônica sofisticada [32].

Atualmente, o material mais amplamente utilizado para RPL é um vidro de fosfato ativado por prata, cuja composição foi otimizada através uma extensiva experimentação. Íons de prata Ag^+ são uniformemente distribuídos no vidro. Antes da irradiação, este vidro é fotoluminescente e emite luz de comprimento de onda curta do UV próximo. Após a irradiação, elétrons livres (e^-) e buracos (h^+) são criados e migram com diferentes constantes de difusão, causando a formação de centros de luminescência estáveis Ag^0 e Ag^{++} como segue: $\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}^0$ e $\text{Ag}^+ + h^+ \rightarrow \text{Ag}^{++}$. A formação destes centros de luminescência é diretamente proporcional à irradiação do vidro ao longo de uma ampla faixa de valores de doses.

Quando são excitados, os centros Ag^0 emitem luz azul, enquanto os centros Ag^{++} emitem luminescência laranja mais intensa [33, 34]. Como os elétrons livres têm uma maior

mobilidade, os centros Ag^0 aparecem mais rapidamente do que os centros Ag^{++} . Portanto, aplica-se pré-aquecimento a 100 °C durante 30 minutos, a fim de aumentar a mobilidade dos buracos e facilitar a formação dos centros de Ag^{++} . Os centros de luminescência não se revertem espontaneamente para Ag^+ a menos que a temperatura seja elevada para 400 °C durante 1 hora, quando ocorre zeramento. A leitura dos dosímetros de vidro é bastante complexa, e exige a separação da fotoluminescência rápida do vidro, principalmente emitida dentro de 1 μs a partir dos impulsos da excitação, do sinal RPL verdadeiro recolhido até 40 μs dos impulsos, e do sinal de decaimento mais longo devido aos efeitos de contaminação superficial. A composição do vidro está longe de ser tecido equivalente, mas a utilização de filtração apropriada e de uma combinação ponderada dos sinais a partir das diferentes regiões do detector produz uma determinação confiável da quantidades dosimétricas de interesse. Claras vantagens do sistema são a sua completa ausência de desvanecimento, uma resposta linear até 10 Gy e um limite mínimo de detecção da ordem de 10 μGy . Este último fato permite a possibilidade de utilizar os detectores, sem zeramento, através da determinação dos incrementos de dose por diferenciação, sem propagação de erro significativa.

5. CONCLUSÕES

O campo da dosimetria luminescente ainda é muito excitante. Existem técnicas comerciais muito complexas que oferecem desempenho com alta sensibilidade. Atualmente, a dosimetria luminescente caminha mais intensamente em direção à dosimetria por fotoestimulação que, com a sua natureza de leitura inteiramente óptica, não necessita de aquecimento do detector eliminando, assim, problemas associados a diminuição da eficiência luminescente com o aumento da temperatura. De fato, um dos serviços comerciais de dosimetria mais difundidos globalmente se baseia em cartões OSL, enquanto que a RPL está crescendo fortemente e já é dominante comercialmente em alguns países, como o Japão. No entanto, os custos são bastante elevados e isso justifica e explica o fato de que ainda há uma grande quantidade de pesquisa e desenvolvimento no campo de termoluminescência, que oferece uma variedade muito mais ampla de materiais dosimétricos normalmente mais fáceis de sintetizar e que são normalmente muito mais tecido equivalentes do que os compostos mais comuns OSL ou RPL.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências de fomento brasileiras FAPITEC-SE, CAPES, CNPq, FAPESP, e ao Instituto Nacional de Metrologia das Radiações na Medicina (INCT).

REFERÊNCIAS

1. A. Delgado, J.M. Gomez Ros, J.L. Muniz, “Computerized analysis of LiF GR-200 TL signals: applications to dose measurements in the μGy range”, *Radiation Protection Dosimetry*, **60**, pp. 147–153 (1995).
2. Y.S. Horowitz, M. Moscovitch, “Highlights and pitfalls of 20 years of application of computerized glow curve analysis to thermoluminescence research and dosimetry”, *Radiation Protection Dosimetry*, **153**, pp. 1–22 (2013).
3. M. Osvay, L. Lembo, “Comparative Investigations on UV Sensitivity of Newly Developed LiF TL Detectors”, *Radiation Protection Dosimetry*, **47**, pp. 227-230 (1993)
4. C. M. H. Driscoll, ”Dose Re-assessment of LiF:Mg,Cu,P”, *Radiation Protection Dosimetry*, **19**, pp. 59-61 (1987).
5. M. H. Kharita, R. Stokes, S. A. Durrani, “Phototransferred Thermoluminescence (PTTL) in LiF(Mg,Cu,P) (GR-200)”, *Radiation Measurements*, **23**, pp. 493-496 (1994).
6. M. Moscovitch, L. Benevides, A. Romanyukha, F. Hull, M. Duffy, S. Voss, K.J. Velbeck, I. Nita, J.E. Rotunda, “The applicability of the PTTL dose re-analysis method to the Harshaw LiF:Mg,Cu,P material”, *Radiation Protection Dosimetry*, **144**, pp. 161-164 (1-4), (2011).
7. L.F. Souza, R.M. Vidal, S.O. Souza, D.N. Souza, Thermoluminescent dosimetric comparison for two different MgB₄O₇:Dy production routes. *Radiation Physics and Chemistry*, Accepted for publication, (2014).
8. H.R.B.R. Lima, D.S. Nascimento, G.F.C. Bispo, V.C. Teixeira, M.E.G. Valério, S.O. Souza, “Production and characterization of spodumene dosimetric pellets prepared by sol-gel route”, *Radiation Physics and Chemistry*, Accepted for publication, (2014a).
9. H.R.B.R. Lima,; D.S. Nascimento, S.O. Souza, “Production and characterization of spodumene dosimetric pellets by prepared by pechini and proteic sol-gel route”, *Radiation Measurements*, Accepted for publication, (2014b).
10. L. Bøtter-Jensen, S.W.S. McKeever, A.G. Wintle, *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry*, Elsevier, Amsterdam (2003).
11. E.G. Yukihara, S.W.S. McKeever, *Optically Stimulated Luminescence: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK (2011).
12. L. Oster, S. Druzhyina, Y.S. Horowitz, “Optically stimulated luminescence in LiF: Mg,Ti: application to solid-state radiation dosimetry”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **648**, pp. 261–265 (2011).
13. M.S. Akselrod, N. Agersnap Larsen, V.H. Whitley, S.W.S. McKeever, “Thermal quenching of F-center luminescence in Al₂O₃:C”, *Journal of Applied Physics*, **84**, pp. 3364–3373 (1998).
14. S.W.S. McKeever, M. Moscovitch, P.D. Townsend. *Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses*. Nuclear Technology Publishing, Ashford (1995).
15. V.V. Antonov-Romanovsky, I.F. Keirum-Markus, M.S. Poroshina, Z.A. Trapeznikova, “Dosimetry of ionizing radiation with the aid of infrared sensitive phosphors” Conference of the Academy of Sciences of the U.S.S.R. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Moscow, *USAEC Report AEC-tr-2435* (Pt. 1), pp. 239–250 (1955).
16. M.S. Akselrod, V.S. Kortov, D.J. Kravetsky, V.I. Gotlib, “Highly sensitive thermoluminescent anion-defect α -Al₂O₃:C single crystal detectors”, *Radiation Protection Dosimetry*, **33**, pp. 119–122 (1990).
17. A.J.J. Bos, “High sensitivity thermoluminescence dosimetry”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **184**, pp. 3–28 (2001).

18. M. Moscovitch, R.A. Tawil, M. Svinkin. "Light induced fading in α -Al₂O₃:C", *Radiation Protection Dosimetry*, **47**, pp. 251–253 (1993).
19. H.O. Albrecht, C.E. Mandeville, "Storage of energy in beryllium oxide", *Physical Review*, **101**, pp. 1250–1252 (1956).
20. G. Busuoli, L. Lembo, R. Nanni, I. Sermenghi, "Use of BeO in routine personnel dosimetry", *Radiation Protection Dosimetry*, **6**, pp. 317–320 (1983).
21. G. Scarpa, "Dosimetric use of beryllium oxide as a thermoluminescent material - a preliminary study", *Physics in Medicine and Biology*, **15**, pp. 667–672 (1970).
22. E. Bulur, H.Y. Göksu, "OSL from BeO ceramics: new observations from an old material", *Radiation Measurements*, **29**, pp. 639–650 (1998).
23. M. Sommer, J. Henniger, "Investigation of a BeO-based optically stimulated luminescence dosimeter", *Radiation Protection Dosimetry*, **119**, pp. 394–397 (2006).
24. M. Sommer, A. Jahn, J. Henniger, "Beryllium oxide as optically stimulated luminescence dosimeter", *Radiation Measurements*, **43**, pp. 353–356 (2008).
25. H.H. Li, Z.Y. Xiao, R. Hansel, N. Knutson, D.S. Yang, "Performance of KCl:Eu²⁺ storage phosphor dosimeters for low-dose measurements", *Physics in Medicine and Biology*, **58**, pp. 4357–4366 (2013).
26. A.J.J. Bos, M. Prokić, J.C. Brouwer, "Optically and thermally stimulated luminescence characteristics of MgO:Tb³⁺", *Radiation Protection Dosimetry*, **119**, pp. 130–133 (2006).
27. L.C. Oliveira, B.A. Doull, E.G. Yukihara, "Investigations of MgO: Li,Gd thermally and optically stimulated luminescence", *Journal of Luminescence*, **137**, pp. 282–289 (2013a).
28. L.C. Oliveira, E.D. Milliken, E.G. Yukihara, "Development and characterization of MgO: Nd,Li synthesized by solution combustion synthesis for 2D optically stimulated luminescence dosimetry", *Journal of Luminescence*, **133**, pp. 211–216 (2013b).
29. J.H. Schulman, R.J. Ginther, C.C. Klick, R.S. Alger, R.A. Levy, "Dosimetry of X-Rays and Gamma-Rays by Radiophotoluminescence", *Journal of Applied Physics*, **22**, pp. 1479 - 1483 (1951).
30. R. Yokota, H. Imagawa, "Radiophotoluminescent Centers in Silver-Activated Phosphate Glass", *Journal of the Physical Society of Japan*, **23**, pp. 1038 – 1048 (1966).
31. E. Piesch, B. Burgkhardt, M. Fischer, H.G. Röber, S. Ugi, *Radiation Protection Dosimetry*, **17**, pp. 293 – 297 (1986).
32. T. Yamamoto, "RPL Dosimetry: Principles and Applications" AIP Conference Proceedings 1345, 217 – 230 (2011).
33. Y. Miyamoto, T. Yamamoto, K. Kinoshita, S. Koyama, Y. Takei, H. Nanto, Y. Shimotsuma, M. Sakakura, K. Miura, K. Hirao, "Emission mechanism of radiophotoluminescence in Ag-doped phosphate glass", *Radiation Measurements*, **45**, pp. 546 – 549 (2010).
34. T. Kurobori, W. Zheng, Y. Miyamoto, H. Nanto, T. Yamamoto, "The role of silver in the radiophotoluminescent properties in silver-activated phosphate glass and sodium chloride crystal", *Optical Materials*, **32**, pp. 1231 – 1236 (2010).