بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

تأثیر واپاشی رادون اتمسفری بر خطوط مشخصه‌ی هدف مس در طیف سنجی فروشکست القایی لیزری

علیرضا موسی‌خانی[۱]، پرویز پروین[۱،*]، محمد مسعود هاشمی[۲]، سیده زهرا مرتضوی[۳] و علی ریحانی[۳]

[۱]دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
[۲]گروه فیزیک، مرکز تحصیلات تکمیلی دانشگاه پیام نور، تهران
[۳]گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

چکیده – خطوط نشری مشخصه هدف فلزی مس در حضور رادون با استفاده از روش طیف سنجی فروشکست القا شده توسط لیزر *Q-SW Nd:YAG* در یک محفظه کنترل شده پرتودهی، بررسی شد. با توجه به آزمایشات قبلی خطوط نشری گونه‌های فلزی در مخلوط (رادون + هوا) نسبت به هوای سنتز شده (هوای بدون رادون) قویاً افزایش یافته‌اند. به مرور زمان به علت واپاشی رادون شدت قله ها کاهش می یابند، به طوری که امکان بالقوه تعیین نیمه عمر واپاشی رادون با روش اپتیکی نیز فراهم می گردد. در این مقاله سعی شده است که از روشهای نوری برای تعیین مشخصه های هسته ای بهره‌گیری شود.

کلید واژه- طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری، رادون، طیف نشری مشخصه، نیمه عمر واپاشی رادون

The effect of atmospheric Rn trace decay on Cu target characteristic lines in laser induced breakdown spectroscopy

A.Moosakhani[1], P.Parvin[1,*], M.M.Hashemi[2], S.Z.Mortazavi[3] and A.Reyhani[3]

[1]Physic Department, Amirkabir University of Technology, Tehran
[2]Physic Department, Doctorate Technical Center of PNU, Tehran
[3]Physic Department, I.K.I University, Qazvin

Abstract- Several characteristic emission lines due to the metal target (Cu) were investigated in the presence of radon trace in the atmospheric air using Q-SW Nd:YAG laser induced plasma within the irradiation control chamber. Regarding the previous experiments the emission lines of metal species in (Rn+air) are noticeably enhanced respect to those in the synthetic air, while those peak intensities instantaneously decreases due to radon decay, such that the *radon's half-life* can be determined by an optical method too. Here we made an attempt to utilize optical methods in order to determine nuclear characteristics accordingly.
Keywords: Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Radon, Characteristic Emission Spectra, Radon's Half-Life.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

۱- مقدمه

رادون گاز نادر بی رنگ، بی بو و بدون طعم پرتوزا می باشد که پایدارترین ایزوتوپ آن ^{222}Rn با نیمه عمر ۳/۸ روز است. غلظت رادون محیط تابعی از زمان و شرایط آب و هوایی است. معلوم شده غلظت رادون از ۰/۱ Bq/m^3 در بالای اقیانوسها یا نواحی قطب جنوب تا $۱۰^۶$ Bq/m^3 در معدن تهویه نشده ی اورانیوم متغیر می باشد. آشکارسازی رادون مورد توجه ویژه می باشد زیرا رادون بطور طبیعی گاز پرتوزای ناشی از زنجیره ی واپاشی اورانیوم یا توریوم، و شاخصی برای اکتشاف معدن اورانیوم و عنصر مفیدی برای پیش بینی زمین لرزه است.

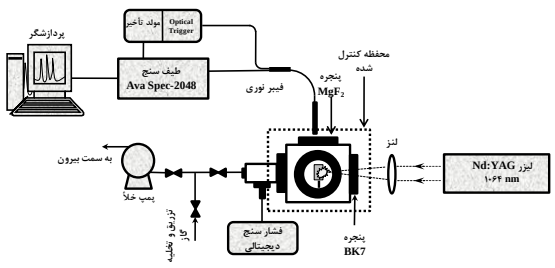
فناوری طیف سنجی فروشکست القایی لیزری (LIBS) کاربرد وسیعی در آنالیز عنصری مواد پیدا کرده است. برخلاف روشهای طیف نمایی دیگر، LIBS نیازی به آماده سازی نمونه ندارد و مقدارکمی ماده (حدود۱μg) برای آنالیز نیاز می باشد. استفاده از روش LIBS به تشخیص گازهای تک اتمی مانند گازهای نادر که می توانند به عنوان گاز واسط بکار برده شوند محدود می شود [۱]. در میان آنها، آرگون گاز بسیار رایجی در فرایندهای کندگی لیزری می باشد که اثر آن همچنین اثر نئون و هلیوم بررسی شده اند [۲]. آشکارسازی غلظت رد هلیوم و آرگون در اتاقک کنترل با لیزر Nd:YAG سوئیچ-Q نیز پیشتر انجام شده است.

علاوه بر ایزوتوپهای پایدار، روش LIBS مزایای شناخته شده ای برای تشخیص مواد رادیواکتیو مانند تعیین غلظت اورانیوم در نمونه‌ی کانه، آشکارسازی اورانیوم در محلول، شناسایی عناصر آزاد شده از پاره های شکافت و تعیین نسبت ایزوتوپهای پلوتونیوم بکار برده شده است. در اینجا، LIBS با هدف فلزی بکار برده شد تا دامنه ی خطوط مشخصه ی مس (Cu) در محیط های (هوا + رادون) و هوای اتمسفری با یکدیگر مقایسه شود و تغییرات زمانی افت دامنه ی قله های مشخصه فلز پایش گردند.

۲- روش آزمایش

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، چیدمان آزمایش شامل یک چشمه ی همدوس فروسرخ (IR)، وسایل نوری انتقال دهنده و کانونی کننده، آشکارساز، طیف سنج، پردازشگر، فشارسنج و سیستم خلأ و تزریق گاز می باشد. لیزر نئودیمیوم- یاگ (Nd:YAG) سوئیچ Q، با انرژی پالس ۱۰۰ mJ، پهنای پالس ۱۰ ns، نرخ تکرار ۵ Hz بعنوان چشمه ی همدوس در طول موج ۱۰۶۴ nm برای ایجاد میکرو پلاسما در گاز داخل اتاقک کنترل بکار برده شد. از مس به عنوان هدف فلزی استفاده گردید.

به منظور نگهداری خلأ بالا در داخل اتاقک و جلوگیری از فشار جو یک شیر خلأ (Balzer) به اتاقک متصل گردید. همچنین سیستم خلأ و تزریق گاز شامل پمپ خلأ بالا Leybold (با $۱۰^{-۳}$ mbar، $۱۰^{۳}$ m^3/hr)و فشارسنج دیجیتال (با دقت ۰/۱ mbar) می باشد. به منظور افزایش چگالی توان باریکه ی لیزر ورودی یک عدسی BK_7 (با فاصله کانونی ۱۵۰ mm) جلوی باریکه ی ورودی قرار داده شد. ناحیه ی کانونی طوری تنظیم شده که در سطح هدف فلزی واقع شود. گسیل نور پلاسما توسط یک فیبرنوری جمع آوری می شود. خروجی فیبر به ورودی یک طیف سنج مدل Avantes، ۱۱۰۰ nm – ۲۰۰ ، با زمان جمع‌آوری ۱/۱ ms ، تفکیک ۰/۴ nm ، و زمان تأخیر ۲μs متصل می باشد. یک اتاقک دارای شش خروجی بعنوان اتاقک تابش دهی از فولاد ضد زنگ طراحی شده است. سه پنجره ی BK_7، یکی برای ورود تابش IR به اتاقک و دو پنجره ی دیگر برای مشاهده ی توده ی پلاسما بکار برده می شود. یک پنجره MgF_2 برای جمع آوری و گسیل تابش پلاسما بویژه در ناحیه ی فرابنفش- مرئی طیف در قسمت بالای اتاقک قرار داده می شود. یک روزنه برای تنظیم جهت گیری نگهدارنده هدف و روزنه ی دیگر برای خروج گاز استفاده می شود.



شکل ۱. چیدمان LIBS برای تشخیص رادون در هوای داخل یک اتاقک کنترل [۳]

چشمه ی رادون شامل رادیوم خشک سنتز شده در خاک داخل یک محفظه ی بسته می باشد و دستگاه تهویه برای

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

تخلیه ی رادون در یک محیط ایمن بکار برده می شود. به منظور پر کردن اتاقک کنترل با رادون، ابتدا اتاقک با پمپ گردان تا 10^{-3} mbar تخلیه گردید، سپس اجازه داده شد هوا و مقداری گاز رادون در حد $27\ kBq/m^3$ در فشار اتمسفری به داخل اتاقک جریان یابد.

اتاقک طوری قرارگرفته است که باریکه ی لیزر از میان عدسی BK_7 عبور کرده و به هدف فلزی برخورد نموده تولید پلاسما نماید. تارنوری در مقابل پنجره ی MgF_2 قرار داده شد تا گسیل های پلاسمای ایجاد شده را جمع آوری نماید. به منظور حفظ شرایط یکسان در طی آزمایشات گرفتن طیفهای گسیل، تارنوری در جای مناسبی ثابت گردید. تعدادی طیف گسیل در فشارهای متفاوت با استفاده از فشارسنج دیجیتال با دقت ۰/۱ mbar بدست آورده شد. خطوط مشخصه با استفاده از نرم افزار AvaSoft 7.6 طیف سنج Avantes مشخص گردید. افزایش گسیل مشخصه مس در محیط (هوا + رادون) نسبت به هوا و گسیل لحظه ای آن مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و مباحث

۳-۱- طیف گسیل

اکتیویته ی رادون پرتوزا در زمان t توسط رابطه ی زیر داده می شود [۴]:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \qquad (۱)$$

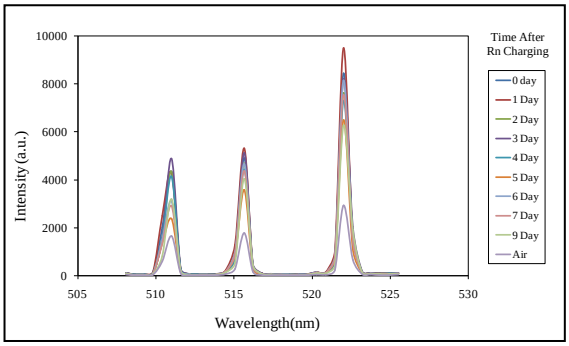
که A_0 فعالیت اولیه ی رادون برای t= ۰ (در اینجا $27 kBq/m^3$) و λ ثابت واپاشی است که برای ^{222}Rn بصورت زیر نوشته می شود:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{3.8} = 0.182 d^{-1} \qquad (۲)$$

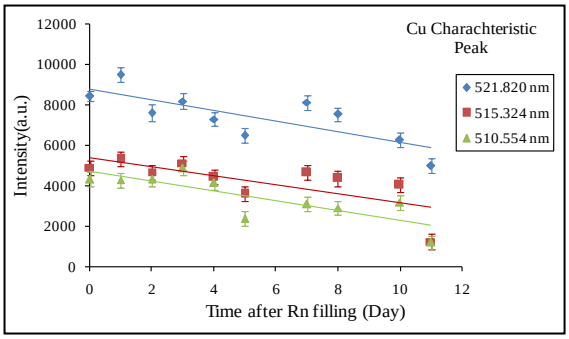
در اینجا نیمه عمر $t_{1/2}$ زمانی است که فعالیت رادون به نصف مقدار اولیه اش می رسد.

شکل ۲ قله های مشخصه ی گونه های مس در محیط (هوا + رادون) در زمانهای متفاوت بعد از پر کردن اتاقک، و قله های مشخصه در محیط هوای بدون رادون را نشان می دهد. مشاهده می شود که گسیل های لحظه ای با زمان بطور قابل توجهی کاهش می یابد.

شکل ۳ گسیل های مشخصه Cu(I) را در ۵۱۰/۵۵۴، ۵۱۵/۳۲۴ و ۵۲۱/۸۲۰ نانومتر در محیط (هوا + رادون) اتمسفری برحسب زمان نشان می دهد.



شکل ۲: خطوط مشخصه ی لحظه ای Cu(I) در ۵۱۰/۵۵۴ ، ۵۱۵/۳۲۴ و ۵۲۱/۸۲۰ نانومتر در محیط (رادون + هوا) در فشار اتمسفری بعد از پر کردن اتاقک کنترلی با (رادون + هوا)، و قله های مشخصه در محیط هوای بدون رادون



شکل ۳: شدت های گسیل مشخصه ی Cu(I) در ۵۱۰/۵۵۴ ، ۵۱۵/۳۲۴ و ۵۲۱/۸۲۰ نانومتر در محیط (رادون + هوا) در فشار اتمسفری برحسب زمان بعد از پر کردن اتاقک کنترلی با رادون و هوا (روز)

۳-۲- پارامترهای پلاسما

تقریب تعادل گرمایی موضعی (LTE)، دمای برانگیزش الکترونی با استفاده از روش ترسیم بولتزمن که در معادله (۳) آمده بدست آورده شد[۳]:

$$\ln\left[\frac{I_{ij}}{A_{ij} g_i}\right] = \ln\left[\frac{F}{U^s(T)} n^s\right] - \frac{1}{kT} E_i \qquad (۳)$$

در اینجا I_{ij} ، n^s ، A_{ij} ، g_i ، E_i ، K و $U^s(T)$ به ترتیب شدت خط متناظر با گذار بین دو تراز انرژی E_i و E_j ، غلظت گونه های s (منظور از گونه، حالت اتمی یا یونی یک عنصر است)، احتمال گذار از حالت i به j ، انرژی گذار حالت انرژی بالایی i، وزن آماری ترازبالایی i ، ثابت

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

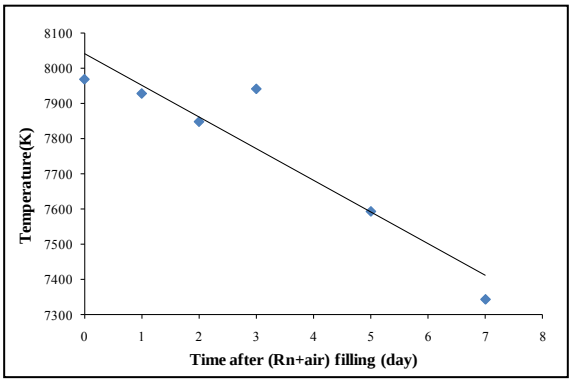
بولتزمن و تابع تقسیم گونه های s در دمـای برانگیـزش T می باشند [۳].

دمای پلاسما کـه بـا اسـتفاده از شـش خـط مشخصـه ی Cu(I) در ۴۲۷/۰۸۵، ، ۴۶۴/۵۴۳، ۵۰۹/۹۹۱، ۵۱۴/۶۳۹، ۵۲۱/۶۰۷ و ۵۷۷/۷۲۶ نانومتر محاسبه گردیدند، بـرای رد رادون در هوا در فشار اتمسفری بـا هـدف مسـی، و بـرای زمان‌های مختلف در جدول ۱ خلاصه شده اند.

جدول ۱: دمای پلاسما برای هدف مـس در محـیط (هـوا + رادون) در زمان های متفاوت

زمان بعد از تزریق (هوا + رادون) (روز)	دما (K)
۰	۷۹۷۰
۱	۷۹۳۰
۲	۷۸۵۰
۳	۷۹۴۳
۵	۷۵۹۵
۷	۷۳۴۵

بعلاوه، شکل ۴ دمای پلاسما را در هـدف مسـی برحسـب زمان نشان می دهد. ملاحظه می شود کـه وقتـی شـرایط آزمایشگاهی یکسان نگه داشته شود، دمای T_e پلاسـما در (هـوا + رادون) بـا گذشـت زمـان و کـاهش اکتیویتـه (یـا غلظت) رادون ناشی از واپاشی آلفا اندکی کاهش می یابد.



شکل ۴ . دمای پلاسما برحسب زمان بعد از تزریق (هوا + رادون) (روز)

در واقع با کاهش رادون ناشی از واپاشی در طول چند روز از میزان بارفضایی در محیط گازی اتاقک بـه میـزان قابـل توجهی کاسته می شود و لذا تولید پلاسمای لیـزری نیـاز به یونش بیشتر توسط باریکه لیزری داشته و لذا از دمـای الکترونی پلاسما کاسته می شود. به عبـارت دیگـر، سـهم انرژی کمتری به انرژی جنبشی الکترونی داده می شود.

۴- نتیجه

رادون پرتوزا ذرات آلفای با انرژی ۵/۴۸ MeV گسیل می نماید که تعدادی زوج الکترون- یون در اتاقک کنترل تولید می کنند. این باعث افزایش میزان الکترون های اولیه با تابع توزیع انرژی الکترون(EEDF) مناسب در اتاقک می شود، که به نوبه ی خود تولید پلاسما را آسان می نماید. در پلاسمای القایی لیزری، این واقعیت به جمعیت دار کردن بیشتر گذارهای اتمی کمک کرده و باعث ایجاد پروفایل گسیل مشخصه ی شدیدتر می شود.

با گذشت زمان رادون واپاشی نموده و از آنجایی که دخترهایش ($^{218}_{84}$Po و $^{214}_{84}$Po) نیز گسیلنده ی آلفا با نیمه عمرهای کوتاه هستند(به ترتیب، ۳ دقیقه و ۱۶۴ میکرو ثانیه)، پس به مرور زمان اثر برهم کنش آلفا با اتم ها ی پلاسما، یعنی تولید الکترون های اولیه ی اضافی، کاهش یافته منجر به کاهش شدت های گسیل می شود.

۵- مراجع

[1] D. A. Cremers, L. J. Radziemski, Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy John Wiley and Sons Ltd., West Sussex, England, 2006.

[2] W. Sdorra and K. Niemax, Basic investigations for Laser Microanalysis : III. Application of different buffer gases for laser-produced sample plumes , Mikrochimica Acta, 1992, 107, 319-327.

[3] S. Z. Shoursheini, B. Sajad, P. Parvin, Determination of gold fineness by laser induced breakdown spectroscopy with the simultaneous use of CW-CO2 and Q-SW Nd:YAG lasers, Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48, 89-95.

[4] K. S. Krane, Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons, 1988.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]