

LASER-DRIVEN PULSE NEUTRON/X-RAY SOURCES FOR NUCLEAR MATERIAL SECURITY AND SCIENTIFIC APPLICATIONS

Andrea Favalli, Sasikumar Palaniyappan, Robert E. Reinovsky

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA

Abstract

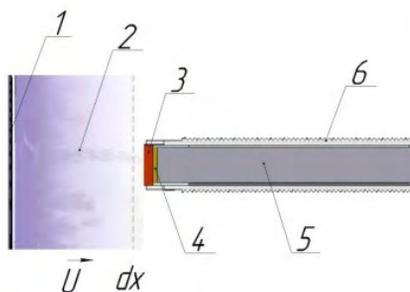
Los Alamos National Laboratory (LANL) has been studying ultra-high intensity laser beam to produced high intensity neutron and X-ray bursts. Using the Trident laser facility (in LANL) we have pioneered a new short-duration, yet intense source of neutron using a short-pulse laser. The neutron source features both high intensity (10^{10} fast neutrons per steradian per pulse) and directionality, and short-duration (~nanoseconds per neutron pulse). At Trident facility, also a high intense laser-driven X-ray pulse source was produced by impinging laser-driven multi-MeV electrons onto a high-Z converter foil. The features of the laser-driven neutron/X-ray sources make them particularly suitable for applications in global nuclear material security. We have been investigating applications, such as assay of special nuclear materials for materials accountancy, safeguards and security applications, spent nuclear fuel assay (at storage facility, in casks, for nuclear debris from reactor accidents). We are also pursuing laser-driven nuclear physics experiments, e.g. neutron resonance spectroscopy and cross section measurements. The experimental results both on the laser-driven neutron/X-ray sources characterization and applications in radiography and active interrogation of nuclear material will be presented and discussed. (LAUR-18-22055)

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПРИ ЛИНЕЙНОМ НАРАСТАНИИ ДАВЛЕНИЯ

*М.В. Антипов, И.В. Юртов, А.А. Утенков, А.В. Федосеев,
В.А. Огородников, А.Л. Михайлов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Одним из наиболее простых, удобных и информативных методов, применяемых в экспериментах по исследованию ударно-волновых и взрывных процессов, является метод пьезоэлектрических датчиков импульсных давлений. Данный метод активно используется, в частности, для исследования процесса ударно-волнового пыления [1] (рисунок 1). По измеренным профилям давлений пылевых потоков на пьезодатчики, установленных на известном расстоянии от свободной поверхности ударно нагруженного образца, определяют скорость, плотность потоков и массу выброшенных частиц.



1 – образец, 2 – пылевой поток, 3 – экран, 4 – пьезоэлемент, 5 – опорное тело, 6 – пьезодатчик

Рисунок 1. Пьезодатчик и пылевой поток

Пылевой поток со временем удлиняется в направлении его движения, из-за чего его плотность уменьшается и давление, оказываемое им на датчик, нарастает плавно вплоть до подлета образца. Подбирая расстояние от начального положения пылящей поверхности можно добиться оптимального режима работы датчиков, при котором давления, создаваемые потоком, находятся в рабочем диапазоне пьезодатчиков. Обычно пьезодатчики располагают на расстояниях от 40 до 80 мм от поверхности образца. Пьезокерамические датчики имеют большую чувствительность и позволяют надежно регистрировать низкоплотные потоки в условиях наличия электромагнитных наводок, верхнее рабочее давление составляет ~0,5 ГПа. Кварцевые датчики сохраняют свою линейность на оказываемое воздействие вплоть до 4 ГПа и позволяют измерять более плотные потоки. В опытах обычно устанавливают оба типа датчиков. В случае, когда пылевой поток однороден, давления, регистрируемые пьезокерамическими и кварцевыми датчиками, обычно близки (рисунок 2).

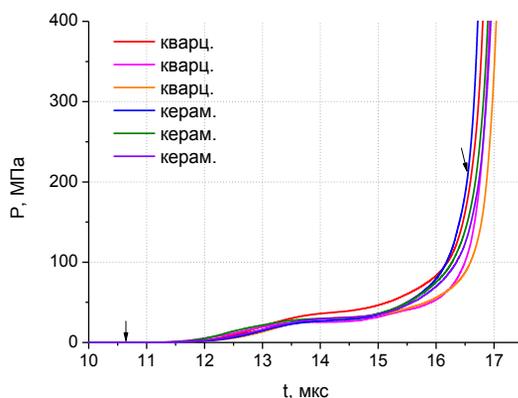


Рисунок 2. Профили давления, зарегистрированные кварцевыми и пьезокерамическими датчиками в одном опыте при их установке на расстоянии 40 мм от исследуемой поверхности

Как правило, при исследовании начальной стадии формирования потоков пыления при многоволновой конфигурации ударных волн, выходящих на поверхность образца, пьезоэлектрические датчики требуется устанавливать как можно ближе к исследуемой поверхности. Однако, проведение таких измерений сопровождается появлением резких спадов сигналов от пьезокерамических датчиков при давлениях, заметно меньших предельных, рисунок 3. Эти спады происходят задолго до подлета свободной поверхности образца к датчикам. Кварцевые датчики при таких измерениях работают вплоть до их разрушения при ударе по ним образца.

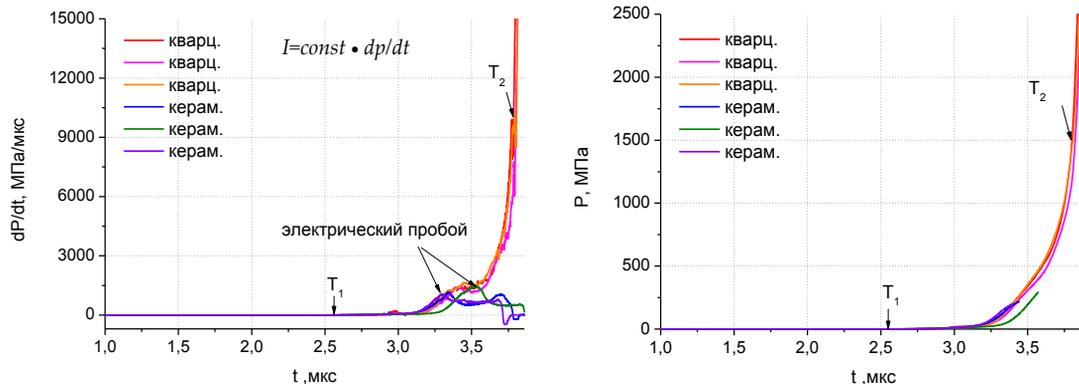


Рисунок 3. Скорость нарастания давления и профили давления при установке датчиков на расстоянии 10 мм

Резкий спад сигналов характерен для процесса электрического пробоя. Однако, максимальные напряжения на пьезоэлементах ~200 В оказались существенно ниже пробойных при

толщинах пьезоэлементов 0,5 мм. Так при статическом напряжении пробой в пьезоэлементах из ПК ЦТС-21 происходит при полях ~ 4 кВ/мм [4], что соответствует напряжению ~ 2 кВ на использовавшихся пьезоэлементах. Было сделано предположение, что сильные поля в объеме пьезоэлементов возникают из-за быстрого нарастания давления, при котором возникает большой его градиент вдоль толщины пьезоэлементов.

В литературе описаны электрическая реакция и электрические поля, возникающие в пьезоэлементах, подвергающихся воздействию давления для двух случаев:

- время изменения давления гораздо больше времени пробега звуковой волны через пьезоэлемент – режим «тонкого» датчика [2], [3], при этом давление во всем пьезоэлементе можно считать одинаковым;

- при нагружении ударной волной, когда фронт ударной волны разделяет пьезоэлемент на сжатую и несжатую зоны – режим «толстого» датчика [2].

В первом случае напряжение на пьезоэлементе и возникающие в нем электрические поля прямо зависят от подключаемой нагрузки. Выделяемый заряд пропорционален прикладываемому давлению (в линейной области), а ток, напряжение и напряженность поля внутри пьезоэлемента пропорциональны производной от давления. Для случая подключения датчика к активной нагрузке, когда $RC_{\text{пэ}}$ много меньше характерного времени изменения давления, имеем:

$$U(t) = R \cdot I(t) = R \cdot d_{ij} \cdot S \cdot \frac{dp(t)}{dt} \quad (1)$$

$$E(t) = \frac{U(t)}{x_0} = R \cdot \frac{d_{ij} \cdot S}{x_0} \cdot \frac{dp(t)}{dt} \quad (2)$$

где d_{ij} – пьезомодуль, S – площадь торца пьезоэлемента, R – подключаемая нагрузка, x_0 – толщина пьезоэлемента.

Как видно из этих выражений, для «тонкого» датчика электрическое поле внутри пьезоэлемента одинаково, если не учитывать краевые эффекты, и прямо зависит от нагрузки, а сигнал прямо пропорционален производной от давления.

Во втором случае генерируемый пьезоэлементом ток пропорционален давлению ударно-волнового нагружения. При этом поля, возникающие в объеме пьезоэлемента, в меньшей степени зависят от нагрузки и, независимо от ее величины, в объеме ПЭ генерируются максимально возможные значения полей для данного давления.

Если в пьезоэлемент входит прямоугольная ударная волна амплитудой p_0 , её фронт делит пьезоэлемент на две части: сжатую и несжатую. Генерируемый импульс напряжения и возникающие в пьезоэлементе электрические поля до выхода фронта ударной волны из пьезоэлемента, описываются нижеприведенными формулами [2].

$$U(t) = R \cdot I(t) = R \cdot \frac{d_{ij} \cdot p_0 \cdot c \cdot S}{x_0} \left(1 - \exp\left(-t/RC\right) \right) \quad (3)$$

Для не сжатой зоны:

$$E_1(t) = \frac{d_{ij} p_0}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(\frac{t}{T} - \left(1 - \exp\left(-t/RC\right) \right) \frac{RC}{T} \right) \quad (4)$$

Для сжатой зоны:

$$E_2(t) = \frac{d_{ij} p_0}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(1 - \frac{t}{T} + \left(1 - \exp\left(-t/RC\right) \right) \frac{RC}{T} \right) \quad (5)$$

Как можно видеть, независимо от величины нагрузки, в пьезоэлементе возникает максимальное электрическое поле, равное:

$$E_{\text{макс}} = \frac{d_{ij} p_0}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (6)$$

При некотором давлении p_0 величина поля E_{\max} будет превышать величину пробивного напряжения и, соответственно, в пьезоэлементе будут протекать пробойные процессы, а генерируемый импульс будет искажаться, что не позволит проводить измерения давления. Это явление ограничивает область применения кварцевых и ниобат-литиевых датчиков ударных волн [2].

Рассмотрение интересующего нас промежуточного случая, когда заметное изменение давления происходит за время, соизмеримое с временем пробега звука по пьезоэлементу, авторам доклада не известно. В дальнейшем такой режим работы будем называть динамическим.

Для описания работы пьезоэлементов при динамическом режиме нагружения разработана математическая модель их электрической реакции. Рассмотрение проведено для аксиального режима нагружения, при котором волна давления распространяется вдоль вектора поляризации в направлении от одного электрода к другому.

Математическая модель.

Будем считать, что давление, входящее в пьезоэлемент, нарастает линейно. При анализе работы пьезодатчика, нагружаемого импульсным давлением, необходимо отдельно рассмотреть два временных интервала:

- 1) от вхождения фронта волны давления в пьезоэлемент до выхода из него;
- 2) после выхода фронта волны давления из пьезоэлемента.

Наращение давления опишем законом:

$$p_{ns}(x, t) = \begin{cases} k \cdot (c \cdot t - x), & x \leq c \cdot t \\ 0, & x > c \cdot t \end{cases} \quad (7)$$

где $k = dp/dx = \frac{dp}{c \cdot dt}$ - крутизна переднего фронта импульса давления, c - скорость звука, t, x - текущие время и координата.

До начала воздействия напряжение между электродами пьезоэлемента равно нулю. Входящая в тело пьезоэлемента волна давления вызывает появление поляризационных зарядов, величина которых зависит от давления в соответствующем слое пьезоэлемента с координатой x :

$$P_x(x, t) = d_{ij} \cdot p(x, t) \quad (8)$$

Напряженность электрического поля внутри пьезоэлемента определяется выражением:

$$E(x, t) = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} (D_x(x, t) - P_x(x, t)) \quad (9)$$

где $D_x(x, t)$ - диэлектрическая индукция, а $P_x(x, t)$ - поляризация в срезе пьезоэлемента с координатой x . Считаем, что внутри пьезоэлемента нет свободных зарядов (нет проводимости), тогда величина $D_x(x, t)$ определяется свободными зарядами на электродах пьезоэлемента - $q(t)$:

$$D(x, t) = D(t) = \frac{q(t)}{S} \quad (10)$$

Напряжённость электрического поля, действующего в пьезоэлементе, определяется суперпозицией поля, создаваемого поляризационными зарядами, зависящими от давления, и поля, создаваемого свободными зарядами, находящимися на электродах пьезоэлемента:

$$E(x, t) = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(\frac{q(t)}{S} - d_y \cdot p(x, t) \right) \quad (11)$$

Разность потенциалов между электродами пьезоэлемента будет равна:

$$U(t) = \int_0^{x_0} E(x, t) dx = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(\frac{x_0}{S} q(t) - d_{ij} \int_0^{x_0} p(x, t) dx \right) \quad (12)$$

С учётом (7), интеграл в (12) будет равен:

$$\int_0^{x_0} p(x,t) \cdot dx = \begin{cases} \int_0^{ct} k \cdot (c \cdot t - x) dx = k \frac{(c \cdot t)^2}{2}, & t \leq \frac{x_0}{c} = T \\ \int_0^{x_0} k \cdot (c \cdot t - x) dx = k \cdot x_0 \left(c \cdot t - \frac{x_0}{2} \right), & t > \frac{x_0}{c} \end{cases} \quad (13)$$

В разомкнутом режиме напряжение на пьезоэлементе полностью определяется поляризационными зарядами. При подключении пьезодатчика к активной нагрузке из-за разности потенциалов заряды будут перетекать через неё с одного электрода на другой. На рисунке 4 показана эквивалентная схема пьезодатчика, подключённого к электрической цепи.

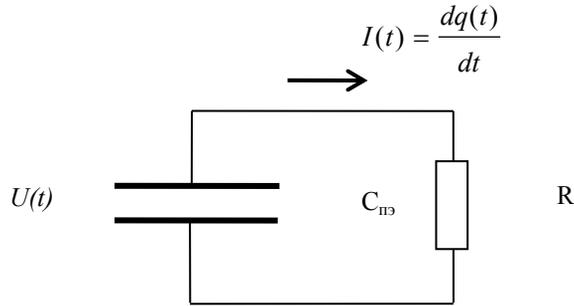


Рисунок 4. Эквивалентная схема пьезодатчика, подключённого к R-нагрузке

Работа такого датчика будет описываться уравнением:

$$RC_{пз} \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d_{ij} \cdot S}{x_0} \int_0^{x_0} p_{пз}(x,t) dx - q(t) \quad (14)$$

В практически важном случае для датчиков импульсных давлений, работающих в короткозамкнутом режиме, выполняется условие $RC_{пз} \sim 0$. Выражение (14) можно преобразовать к виду:

$$\frac{q(t)}{d_{ij} \cdot S} = \frac{1}{x_0} \int_0^{x_0} p(x,t) dx \quad (15)$$

С учетом (13) можно получить выражения для свободных зарядов, перетекших между электродами через нагрузку:

$$q(t) = \begin{cases} \frac{d_{ij} \cdot S}{x_0} k \frac{(c \cdot t)^2}{2}, & t \leq \frac{x_0}{c} \\ d_{ij} \cdot S \cdot k \cdot \left(c \cdot t - \frac{x_0}{2} \right), & t > \frac{x_0}{c} \end{cases} \quad (16)$$

Используя (7), (11) и (16) получим выражение для распределения полей при замкнутом режиме работы пьезоэлемента:

$$\text{для } t \leq \frac{x_0}{c}: E(x,t) = \begin{cases} \frac{d_{ij} \cdot k}{\varepsilon_0} \left(\frac{(c \cdot t)^2}{2x_0} - c \cdot t + x \right), & x \leq c \cdot t \\ \frac{d_{ij} \cdot k}{\varepsilon_0} \cdot \frac{(c \cdot t)^2}{2x_0}, & x > c \cdot t \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{для } t > \frac{x_0}{c}: E(x,t) = \frac{d_{ij} \cdot k}{\varepsilon_0} \left(x - \frac{x_0}{2} \right) \quad (18)$$

Распределения электрических полей по толщине пьезоэлемента для различных моментов времени, рассчитанные по (17) и (18) (рисунок 5).

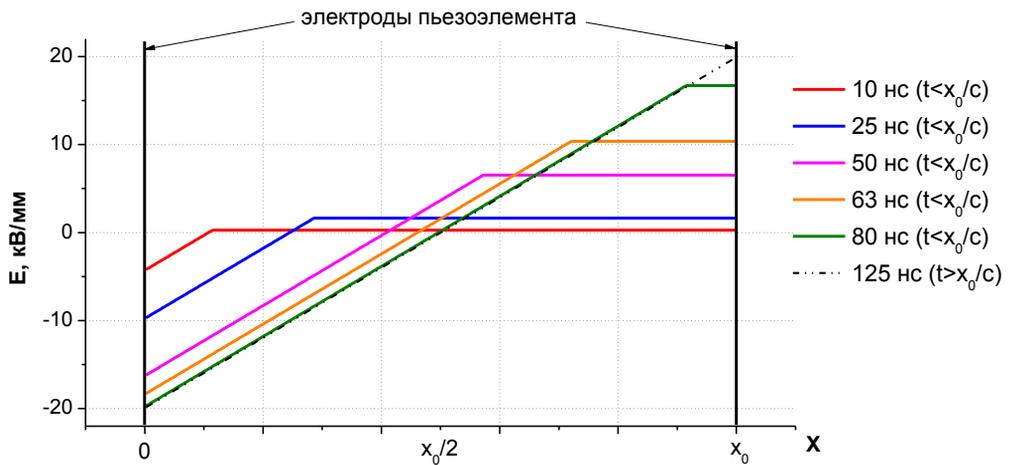


Рисунок 5. Распределения электрических полей внутри пьезоэлемента для различных моментов времени

Из рисунка 5 видно, что электрическое поле в пьезоэлементе распределено неравномерно: оно изменяется вдоль толщины пьезоэлемента.

При вхождении ударной волны и её распространении по пьезоэлементу наибольшее электрическое поле будет возникать вблизи переднего электрода. А своего максимального значения электрическое поле достигнет после выхода фронта волны из пьезоэлемента вблизи обоих электродов:

$$|E_{\max}| = \frac{d_y \cdot k \cdot x_0}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (19)$$

где $k = dp/dx = \frac{dp}{c \cdot dt}$ - крутизна переднего фронта импульса давления

Выражение (19) показывает, что максимальные электрические поля в пьезоэлементе, подключённом к R-нагрузке, при динамическом режиме нагружения зависят от скорости его нарастания, подобно режиму «тонкого» датчика, однако при этом электрическое поле возникает в пьезоэлементе даже при его коротком замыкании. В отличие от «толстого» датчика, величины электрических полей линейно изменяются по толщине пьезоэлемента, при этом их значения зависят не от давления, а от скорости нарастания давления. Из уравнения (15) также следует, что протекший в цепи датчика заряд пропорционален среднему давлению в пьезоэлементе, т.е. в таком режиме датчик усредняет регистрируемое давление по времени пробега волны через пьезоэлемент $\tau = x_0/c_{зв}$.

При определенной скорости нарастания давления поля могут достигать значений, достаточных для проявления нелинейных эффектов: переполяризации и/или для возникновения пробойных эффектов, т.е. генерируемый сигнал нельзя будет использовать для определения давления.

Для пьезокерамических датчиков, на которых наблюдали резкий спад, рисунок 6, расчет электрических полей, возникавших перед пробоем, сделанный по формуле (19), дал значения $E_{\max} = 1,7 \div 3,3$ кВ/мм. При расчете использовали следующие параметры для ПК ЦТС-21: $\epsilon = 480$, $C_{зв} = 3,73$ мм/мкс, $d_{33} = 110$ пКл/н и значения скорости нарастания давления на пиках $dp/dt_{\max} = 1000 - 1900$ МПа/мкс.

Эти поля несколько ниже значений номинального пробойного напряжения 4 кВ для пьезокерамики ЦТС-21 при приложении статического напряжения.

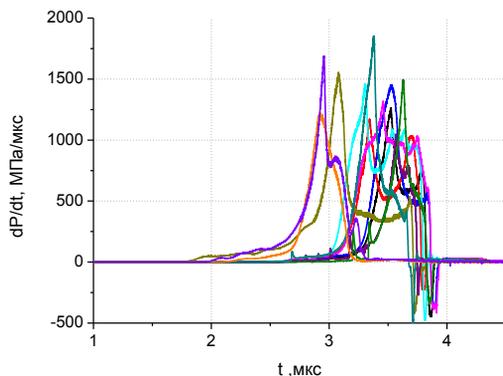


Рисунок 6. Зависимости скорости нарастания давления, зарегистрированные пьезокерамическими датчиками, установленными на расстоянии 10 мм от образца, на которых имеются признаки электрического пробоя

На сигналах большинства кварцевых датчиков спады, характерные для пробоя, наблюдаются в единичных случаях и, вероятно, связаны с наличием дефектов в кристаллах. Пример такого сигнала показан на рисунке 7. Пробой произошел при поле ~ 40 кВ/мм ($\varepsilon = 4,58$, $d_{11} = 2,3$ пКл/н).

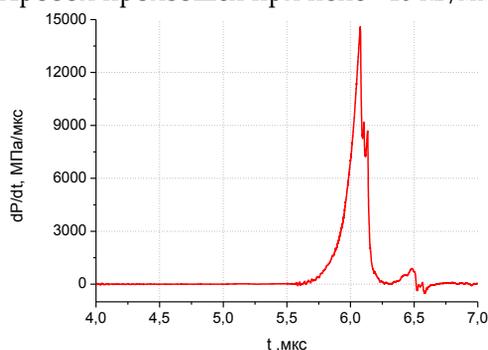


Рисунок 7. Сигнал кварцевого датчика, устанавливавшегося на расстоянии 10 мм от образца, на котором имеются признаки электрического пробоя

Выводы

- Проведенные расчёты и экспериментальные данные показывают, что при планировании экспериментов и обработке полученных с пьезодатчиков данных следует учитывать влияние электрических полей в пьезоэлементах в случаях, когда скорость изменения давления приводит к заметной разнице давлений внутри пьезоэлемента. Критические поля, при этом, близки к пробойным для соответствующего материала, определенным в статических условиях.
- Увеличить диапазон рабочих скоростей нарастания давления можно уменьшая толщину пьезоэлемента. При использовании для расчета давления формулы, применяемой в режиме «тонкого» датчика, получаемое давление будет усреднено по времени пробега волны через пьезоэлемент.

Список литературы

1. М.В.Антипов, А.А.Утенков, И.В.Юртов и др. Применение пьезоэлектрического метода для измерения параметров ударно-индуцированных пылевых потоков // ФГВ, 2018, т.54, №5.
2. Graham R.A. Solids Under High-Pressure Shock Compression // Mechanicals, Physics, and Chemistry, 1993, Springer-Verlag, New York, Inc., 221p.
3. Яровиков В.И. Теоретические основы проектирования пьезоэлектрических датчиков механических величин. Учебное пособие по кафедре «Информационно-измерительные системы»// Москва: МГУЛ, 2001-134с.
4. ОСТ11 0444-87 Материалы пьезокерамические. ТУ.