

Radiation effects on candidate fiber optic sensors for nuclear applications

Chris Petrie

Oak Ridge National Laboratory 3/2/2023

ORNL is managed by UT-Battelle LLC for the US Department of Energy

Contributions from: Dan Sweeney, Holden Hyer, Brandon Wilson, Tony Birri, Tom Blue



${f B}_{uclear}$ applications for fiber optics (not ${f U}$ comprehensive list)



Žrá PĚDĚR^^¦Á cÁn HĚTOB à ãng ^ ÁT a) * and č ¦ã * ĚJ, & QOECODĚR €GÎÌFÈ Žaá ÔÈ ĚÚ/\dǎ Á cán HĚTAB; a/(Ár č & and interview ')) & QOECEDÍRÍ HEFCÈ Žrád ÖÈDĚÛ, ^^} ^ Á cán HĚTAB; a/(* ÁCI[) cÁD} à ÁD ã ãã ^!Á • ã * ÁU] cã and ÁU* |• ^ ÈY ão coáT[å* |and] À(¦Ár * & and CI] | ãand] • ÊÁODÒÒÁ/! a) • ĚQ • d* { ĚT ^ an ĔÇ; } å^¦Ár çã , D Ž á O EÉÓĂ! ãng à Á/ÈDĚÓ|* ^ÉÚ/[* !^• • ÁI Ár * a/ an AC) ^!* * '% \$* QOECEDÍR €HÍÍ CÈ Ž áÁ ÖEÐEÁU, ^^} ^ ÉKDET EÁU&@^||Ébeaj å ÁÖET EÁU^d að ÉKODÒÓÁ/¦æg) • ÉKO, • d`{ ÉAT ^ær È+\$`ÇGECFDÁFET€E Ž áÁ ÔET EÁU^d að ÉKÖEDEÁU, ^^} ^ Ébeaj å ÁP EKSã ÉANÙÁ>[}EÚ![çãráj]æ¢ÁÚæa*} óA>[EÁNÙÁGECFEEE[+H Ï JÁGEFEACE]]|a8ææaj}Á>[EÁ FÎ ÐÌÍÉ ÏÍÉÅ `à|ãr@° å ÁRØ^à!`æ^Á ÉKGECFE

P^æe^¦Á

Ô^} ơ\¦ã * Á[å•

F]VYf'cdhjWgYbgcf'a UhYf]Ug

: i gYX'g]`]WU'[`Ugg'fU!G]C_&Ł

- "ÁT at¢ãţ `{ temperature: F€€€»ÔÁŷţ}}* -term å^çãtãã&æáţ n)
- ∽ Cost KÆ Á ow as ~ŀȀÁ, er meter
- Core dia meter: ~Ì. F€Áµ{n (si}*|^{ [åie)
- · C |æååۇ;*K' Roč@; ^ | ^ accomplished Çãæ chemical do];æ; @Á; Á:世道);
- ″ÁTæb¢ãį ˘{ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ ^ ●Á^} * c@K >> \ã[{ _^ c^ ¦●
- $V^{\hat{}}$ at $A_{\hat{a}} = A_{\hat{a}} + A_{\hat{a} + A_{\hat{a}} + A_{\hat{a}} + A_{\hat{a}} + A_{\hat{a$

G]b[Y!WmgHJ gUdd\]fY fl !5 `_&C.Ł

- T1 æ¢ã, `{ , c^{] ^ ¦æč ¦^ : FÏ €€. FÌ €€»Ô; ⊣å^{ [}•dæc^å, close to ~G€€€»Ô; { ^|@j*][ĝ.c
- Cost KÁSIÅF\],^¦Á(, ^♂¦
- D⊨æ{⊦^ơ\¦KÏÍ.Í€€Áµ{⊣
- Ô|æååậ*∶¤[.}^
 - OBBcãç^ÁÜBÖÁvæel*^cãj*Árâj*|^{[å^ . []^¦æeãį}}
- Mæ¢ā[,`{, &[}cāj`[`•Á(^}*c@ká(^c^\•
- T/ĭ•c ⇒ à^Áậ*|^Ë&¦^•cæ|ậ^^Á{ = æç[⊣ãåÁ &ææ^¦ậ* |[••^•ÁæA ¦æậ Áà[š`}åæa?•





$U:G]C_{8}$ <][\ hYa dYfUhi fY d Y[fUXUh]cb

- Ú[|^{ ^ | Ëaæ^ åÁ &[ææ∄ * Áà` | } ÁæcÁGEE: 14EE ÁÔÁÇ^`´ ã^ Á { ^ cæ¢Á&[ææ∄ * • [| Á @ æc@ Á[| Á] | [c^ &cã] } D
- I} & '^æ ^å Á H a à•['] œ[} near 1400 } {. a}å NÁFÌ €€
 } { .Á§ Á ! ^• Á nce [ÂP Á ! ÂP Á ! ÂP Á ! ÁBCÁNÁdÎ~€€»Ô :
 Q, æ) æ ^æ ^æà ^
- |} &'^æ^åÁJÁ [.àããã ÁæA 600°C
 - Þ[Áã}ããæ) oÁ ~^8o4[} dæ) {ã•ã[}

 - Ôæ) Áà^Áæåå¦^●●^å/àî^Áæ¢c^¦ãj * Áãà^¦Áį¦Á ã } æ¢Á,¦[&^●●ãj *
- Ö[] æ) Óåã~č•ã[} æóÁVÁF€€€»Ô;
- 8 Yj]hf]ZJWUhjcbžcf WinghU`]nUhjcbžUhhYa dYfUhi fYg'cZ
 ~-\$\$\$7 UbX UVcjYffUhY'XYdYbXg'cb'hYa dYfUhi fY
 - ÌÍ**€≫ÔkÁQ**å^~∄jãe^Ñ [™]
 - . Á J€€»ÔkkÖæ•Á{[Á,^^\• ?
 - . Á F€€€»Ôk⁄Öæ••
 - .Á FF€€»ÔkÁ⊾FÁåæî

ŽraÁ09EPÈÄÜ[●^ÊA%G>çãdãã&æaā[}/\$9,Á05;}^æ†^åÁ U]c3&æ‡ÁØãa^¦Ê=ÁR[č];#4A[~ÁŠã*@ç;æç;^Á/^&@?[/[*^Á %)ÇFJJÏDÁL€].ÌFIÈ





Žá Ó É É Ý (* 1. "High Temperature Effects on the Light Transmission through Sapphire Optical Fiber," Journal of the American Ceramic Society %% (CEF) DÁI Í GÉI Í JÉ

Gjb[`YWmghU`gUdd\]fY fl !5`&C'Łjg. Ua cfd\ cig`g]`]Wcb X]cl]XY fU!G]C&L

- - Pexagonal close packing o ÁDÁÇ anion sublattice DÁCE occupies 🖽 of octahedral interstices
 - . Þo *¦æў, ьоц}忦ð\•Áį́́А́^¦ḉ^ÁǽÁ́ð]\•Á́[¦ point defects
 - Ú[ā] cÁ&^^^& @ -NÁtæ]]ā] * Árcæe^• Á§ Áaæ) å *æ] ÁÉNÁ§ &'^æ^å [] cã&æ‡Áæà•[¦] cā[} ÁsæzÁ?}^!* ã\• Á&[¦!^•][} åā] * Át[Áaæ) å Átæ) •ãæ] }•
 - ابÀ•*(ﷺ، * ﷺ) (فَحْلُمُعْمُ فَحْلَهُمْ اللَّهُ فَحَلَّهُ اللَّهُ عَلَيْهُ اللَّهُ الْحَلَّمَ مَعْلَى فَعَالَ [@] الكَفَرَا المَعَلَى المَحَلَّقَةُ المَحَلَّقَةُ المَحَلَّقَةُ المَحَلَّقَةُ المَحَلَّةُ فَعَلَمُ مَعْمَعُ فَ [@] المُحلَّةِ فَقَدَرَ المَحلَقَةُ المَحَلَقَةُ المَحَلَقَةُ المَحَلَقَةُ المَحَلَقَةُ المَحلَقَةُ المَحلَقَةُ المَحلَقَةُ المَحلَقَةُ المَحلَقَةُ المَحلَقَةُ المَحلَقَةُ المَحلَقَةُ المَح
- Ùājā&æbkÁQE.,{\[\]@{``••d`&c`\^ (åãidãa`čqā[} [~ÁÛāËÜËÜãà[}å;æ)*|^•ÉA,[Á[}*Ëæ)-*^Á,\\å^\ =)
 - Š^••Á^}•ããç^Áξ].[ã, cÅs^~&œ

CfXYfYX'WmghJ'ghfi WifY'cZ !5`_&C.



5 a cfd\ ci gʻghfi Wfi fY`cZU!G]C $_{\&}$



FUX]Uh]cb!]bXi WYX a]a Ybg]cbU i W Ub[Yg

GUdd\]fY`gkY`g`2(ı i bXYf`bYi hfcbÁ]ffUX]Uh]cb`G⁄Q

‴Á Þ[Árçãa^}&^Á,Áræc覿cā[}Á]Á{[ÁdGÈH F€^{GG}Á,B&{^{FG Á} ″Á Ù,^||ā]*Á@ãt@\¦ÁsecÁ@ãt@\¦Ác^{]^¦æcč¦^•



]ffUX]Uhjcb^{*}C&Q

[‴]Á Ùaēč ¦aer∿∙Áæer∿¦ÁdF€^ŒÁ B&{ ^G

:igYX`g]`]WU`WcadUWfg`r&u `ibXYf`bYihfcbÁ

″Á Òč ĭājāā¦ã { Á&[{] æ&cājí } Á[、^¦ÁæeÁ@at @^¦Áe^{{] ^¦æeč ¦^∙

ŽráÔÈ ĚÚ^dā Á váqhĚÁu] c38aqÁtæ) •{ã•ā;}Áş) å Åşã; ^} •ã; aqÁ cæàāãč Á; Áð; * |^Ëst^•cæqÁæ] @ā^Áæơ\¦Á@ã @Ëa[•^Á,^t] / št¦æåãæaā;}Ásæáçæåā;`•Áv{]^¦æč ¦^•Á]; kaj å Åşã; ^} •Á; F[č] æqÁ Ápč&{/æ^/ãæ*)) - "ÇECEDĂrÍ H HOÈ ŽcáÔÈ ĚÚ/dā Á váqhĚÁv&ã @ËÖ[•^ÁV{{]^!æč ¦^ËÔ^]^}å^} vÁÞ^čd[}ÁQ¦æåãæaā;}ÁÔ~^&o Á[}Ác@ÁU] c38æqÁV¦æ) •{ã•ā;}Áæ}åÁÖã; ^} •ã; aqÁÙcæàããč Á[-ÁQE; [¦] @`•ÁØ`•^åÁÙãã&ææã; F[č]; æqÁ; Áp[}ËÔ;'•cæqlã ^ÂÛ[@ã•`)&) "ÇEEJDÁFFJÎÎÌÈÁ

<][\ bYi lfcb'Zi YbW/ ft %\$^{&&} b'#//gh ^{%&} = %&Ë&\$ d dU) m YUgi fYa Ybhg'cZVi `_ cdhjWJ'dfcdYfhjYg







Ž #ÁÔÈ ĔÚ^d â Á vávHĚAU] cBadaÁtæ) • {ã • ā} } Ásij å Åsij ^} • ā} æÁ cæiāãc Á -Á ā * |^ Ësi^ • cædÁ æ]] @ā^ Áseơ ¦ Á@ā @ëa [•^Á,^`d [} Ási¦æå ãæeāi, } Áseó kætá] ^ kæókædā[` • Áv {] ^ ¦æč |^ Ai] à Abi à Âsij â F[`/} ædÁ -Áp`&|^æ^/äæ+`)) - "COECCODĂTÍ HIHCE ŽeHÓDE ĔÚ^dā Á vávHĚAB ā @ËO[•^Á/{] ^ ¦æč ¦^EO^] ^} å^} vÁp^`d [] ÁClæå ãæeāi, } ÁO--^&orÁ; } Ás@ÁU] cBadÁ/a) • {ã • ā] } Ásij å ÁÖãi ^} • ā) a ÁDæiājãc Á, ÁQE[[¦] @` • ÁØ` •^åÁDāj & Abi à Abi à Baceái F[`/} ædÁ -Áp[} ËO/^ • cædjāj ^ AÛ[/ã•`) &) "COECCODĂTÍ HIHCE F[`/} ædÁ -Áp[} ËO/^ • cædjāj ^ AÛ[/ã•`) &) "COECCODĂTÍ Ì Ì ÈÁ

7 c m dUf]gcb hc dfYjci s`ck bYi hfcb Zi YbWF]b g]hi m YUgi fYa Ybhg



ŽráÔÈTĚÚ∧dâ∧ÁvádĚÁkul]ca3caqÁtæ)•{ã•ā]}ÁejåÅkāā[^}•ã[}ædÁcæàājāc´Á;-Áāj*|^Ë --&i^•cædÁæ]]@å^æơ\¦Á@ă@Ëå[•^}^`d[}Ási¦æåãææā]} ædýædā[`•Áv{]^¦æc`¦^• □]Át[ÂÌÌ»ÔÊ-F]`¦}ædÁ.AÞ`&|^ætATæv¦ãæd•))-ÇGECEDAFÍHIHG ŽGÁÕÈTĚÚ∧dā/ÁejåÁVÈDĚÓ|`^ÊAQAEEācĂ{¦^æ&dt¦Åæåãææā]}Ë3;å`&^åÁææv}`ææāt] ä}•æa]]@å^Át]ca3cætÁãa^¦•Á@ævå``]Át[FEEE»ÔÊAÞ`&|^æAQQ•d`{^}orea}å T^cQa*A§AÚ@•ã∝s Ü^•^æ&@ÓKAÓ^ætÁQcv¦æ&dat}•Á;ã@Tæv¦ãæd≉ÁejåAOEt{{•`'(&ÇGEFÍDÁFETÄ

7 i ffYbhh Ycfm FUm Y[(\ gWUHYf]b[`cggYg'Zica 'fUX]Uhjcb!]bXiWYX jc]Xg'h Uhc WW f'Uh'][h d cgY UbX'hYa dYfUh fY



Žrá/ÔĔ&Sā;[•@ñazakaa)åÂÜÈRÈZZā;\|^ÊAkú[[ơ]}cãad,Ása)åÁā[ãræaā];}•Á;Á&∧¦æ{88•Á8jÁv\{•Á;Ádč&覿4Ása)åÁ\|^&da8æ4Á ājơ*¦ãc Á8jÁč•ā[}Á}çã[[}{ ^}o*ÊAAŢč/}æ4AjÁa⊅č&{/~æ4Ajæev¦ãed+*C€JJÎDAF€€.FF€ÈA,^}Á|ãa^Á;æ•ơ¦Át

from HFIR tests

 10^{27}

 α -Al₂O₃

----1/3<1010>

······ 1/3<1011>

 10^{28}

-1/3[0001]

Voids

No voids

CUUÞŠD

WIRE-21 experiment

- . V@ermocouples
- Distribut^**å Áãa^¦ [] ය& Ár {] ^¦æč¦^** sensors
- . Self-powered n**^`d[}Áå** !etectors (V emitter)
- 򾥋∡e ÙãÔÁ/T1sæ)åÁ∤č¢ wires
- ´´T [・Á@誰 @`Á\$j・d`Á mented ^¢] ^ ¦ 毳 ment 毳 PØÜ ば Á@をd ¦ ^
- "ÁPāť@Á,^`d[}Áţ`¢KÁdÍ F€Á ¹⁴}_æĐ c m²/s
 ~Í€Á&{ Á{^}}*C@Á,ãc@3,Á`^|^å tregion of C@ Á&[¦^



12

b g]h 'a YUgi f Ya Ybhg c ZU! S_iO_2 **ZVYf gYbgc fg**

- Ú¦ã adā Á Á & •^åÁ À Á æðãæða B E @ da^} ^åÁãa ^!
 ÁÚ \^ÁUð J & Á
 ÁÚ \^ÁUð J & Á
 ÁZ | ^ÁZ
 ÁZ
 ÁZ
 - Õî^Ëå[]^åÁ&[¦^Áãa^¦●Áæ ÁæÁ^~^¦^} &^
- Øãa^¦•Ášj&|čå^åÁjão@æ)å jão@lčóÁãa^¦Ólæ**
 ¦æcāj• (FBGs)
 - V^]^**ÁQáse)**åÁV^]^ ∥

CAK RIDGE National Laboratory

- U] ca&æa,Áàæa&\•&æaac^¦Á^-,∤^&q[{^d^ {^æ•`¦^{ ^} @ Á(æå^Á^ç^¦^Á Á(ʿã)`c^• . Á FÍ H€. FÍ ï GÁ,{
 - . ÁOĘ∥ [, { , ^ æ ` ¦ ^ { , ^ } o ∕[, ∕] æ ãæ ¢ Áçæ ãæ eãt } Á§ Á ¦ ^ - ∤ ^ & c^ å Áæ {] |ãc` å ^ Á Çæ c^ } ` æ ãt } D ∕æ à Á[& æ‡ •] ^ & cl æ ∕ Á @ão•

:]VYf	8 Yg₩]dh]cb	; f Uh] b[g
%	Ú` ¦^ÁÛðU _G Á&[¦^ÉÁØËå[] ^åÁÙðU _G Á ^{),} & æååðj *	₽₽DE
&	َ Õ^Ëå[]^åÂÛðU½&[¦^Ê∮,`¦^Á ÙðU _G ∕&∤æååð <i>;</i> *	
	- ØËä[]^åÁÛðLU _G Á&[¦^Áæ)åÁ & æååð]*Ájão@Ái.JÁ/^]^ÁOQÁ *¦ææðj*•	~FÃŏÁ^-∤^&cãçãcÊ ∼ÎÍÁ{{ {Ár]æ&a}*
(
)	Ú`¦^ÁÙãU _G Á&[¦^ÉÁOËå[]^åÁÙãU _G Á) & æååãj,*Ájãc@ÁCÌÁ/^]^ÁOQÁ *¦ææaj,*•	~ HÃ Á^-∤^&cãçãĉ ÊÁ ~ F€Á[{,Ái]æ&ãj*
*	، \ Õ^Ëå[]^åÁÛðUكى(الالكَ) كَالَى اللهُ الْعَلَى الْمَعَانِ اللهُ الْكَلَى الْمَعَانِ الْمَعَانِ الْمَعَانِ الْ مَعَوَهُ الْمَعَانِ الْمَعَانِ الْمَعَانِ اللَّهِ اللَّعَانِ اللَّعَانِ الْمَعَانِ اللَّعَانِ الْمَعَانِ الْمَع	Ł≘ÈEÃ Á^-∤^&cãçãc ÉÁ F€ĽÍÁ({,Á]æ&ãj*
+	P[[,Á&[¦^Áj@2,d[}ã&Á &'`∙cæ‡Áãa^¦	ылс
,		- του∟ ∧\Áilāh∧Ái ana α∧¦Áiī Áh àāā



GdYWfU`g\]Zrg

- Ö¦ãoÁ§ ÁæÉÜðU_GÁãa^¦•Á?¢]^8c^åÁå`^ q[Á&[{],æ8cã[}
 - . Ú ¦^åã&cãç^ {₋[å^|• Áå^ç^|[] ^å],¦^çãį ˘•|ˆ Ž̄Éá
 - . Þ \^*æaãç^ åŠĐŠÊ][●ãaãç^ å}Đ)Ê}^c à|`^Á@ãc (∥[, ^¦Á, æç^|^}*c@e)
 - Û@Įč|å,Á^æ&&@_^ĭčājāāa ¦ãí{, à^∥[, F€^{©€}Á,Á∰&{^{FÁG},
- T/[å^| æ&&`¦æ¢\^Á&æ}c`;¦^• å¦ãc `],Á{[~H⊧F€^{FJ}Á, _æ ∰{ ^G
- ₩}•æč¦ææ^å⊧å¦ãoÁà^*ðj•ÁææÁ@ðt@\ ⊣`^}&^•
 - Ô`æ)}[c à^ ^¢]|æäj,^å ⇒ à^Áj,¦^çã[`• {_\^æ•`¦^{ ^}œ•Á, -Á&[{]æ&cã[}.áæ)å ¦^,¦æ&cãç^Á§j,å^¢ Á∞eA^ç^}Á@et@o\¦Á }^`d[}Á↓`^}&^



G]a]`Uf``]bYUf`Xf]Zh cVgYfjYX dfYj]cig`mi]b:6;g]b fUbXca U]f!`]bY`Z]VYfg

- Ô[}•ã c^}oÁt^}å•Á
 [à•^¦ç^å為 Áã^+ Áã^+ Á
 ã¦æåãæe^å Áã @⊋ ã@?`oÁ
 ã\æåãæe^å Á
 ã@ Æ
 ã@ Á\$ Á\$
 (@ Æ
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 <l



ŽráTlÈDÈDÈZæ*@[ĭ|ÁróÁad)ÈÁuülæåãææā[}Á^●ãrœa)oÁãa^¦ÁÓ¦æ**Á*¦ææāj*Á§jÁæa)å[{ÁæāiЁāj^Áãa^¦●Á[¦Á<^}●āj*Á æ]][88ææā[}●Á§jÁ, š&|^æáÁ^æ&d[¦Á&[¦^●ÊiÁU]]æ&≉ÁÔ¢];/^●●`&*∵ÇG€FÌDÁrFÏÏÍÉÈ

U]^.₀•|ãå^{ æc^¦Á{[Á∿åãc

K]bX ck s cZcdYfUjcb



U] ^ ⊪ ● |ãã^ { æ• c^¦Áţ Á∿åãc

Questions? Chris Petrie, petrie, cm@ornl.gov

