

Additional Materials for “Tailoring high-temperature radiation and the resurrection of the incandescent source”

(prepared by Ognjen Ilic, ilic@jdg.mit.edu)

February 9, 2016

Our recent work [1] explores the potential of cold-side spectral engineering to tailor thermal radiation emitted by hot objects. In an example presented there, the layered nano-phonic structure was optimized for the quantity of interest expressed by Equation (2) of the paper. Naturally, it is possible to optimize for a different spectral profile, based on application and requirements. The purpose of this short document is to demonstrate that capability for a different figure of merit.

Here, we focus on maximizing the *fraction of total consumed power that is emitted as visible light*. Because incandescent light sources convert almost all of the supplied electrical power into light, the equivalent requirement is the fraction of total emitted light that falls in the visible spectrum. For the purposes of this brief analysis, we consider the visible spectrum to be 380nm-720nm. Following the same optimization scheme as in [1], and using the same set of four materials and refractive indices (bounded by $n = 1.46$ and $n = 2.35$), we reach a structure with the spectral profile shown in Figure 1.

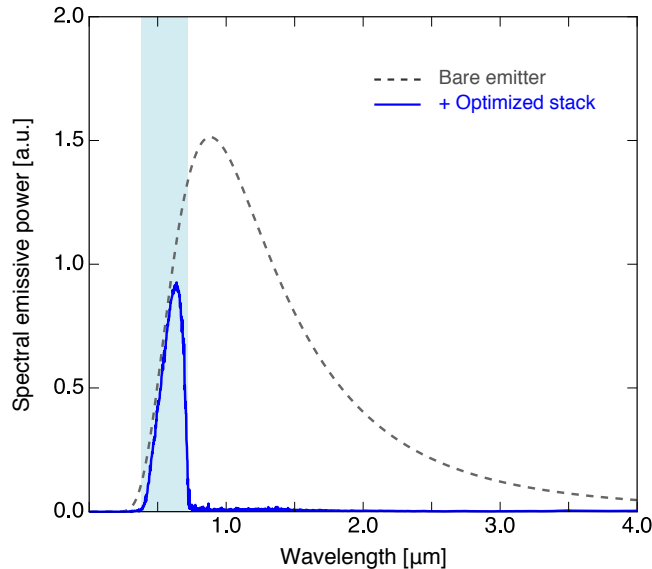


Figure 1: The spectral emissive power of a tungsten emitter optimally enclosed by the structure designed to maximize the fraction of light emitted in the visible spectrum. The power is integrated over all angles (hemispherical emission). Shaded area indicates the visible spectrum.

For this structure, the fraction of light emitted in the visible spectrum is **84%**. To put this value in perspective, we examine a hypothetical structure that has the following reflectance properties:

$$R(\lambda, \theta) = \begin{cases} 0 & \lambda \in \text{visible} \quad (\text{for all angles } \theta) \\ 0.99 & \lambda \notin \text{visible} \quad (\text{for all angles } \theta) \end{cases} \quad (1)$$

where λ, θ are the wavelength and the angle of incidence with respect to the structure surface. This hypothetical structure has perfect transmission in the visible spectrum and reflects 99% of all other light (for all angles of incidence). When the identical thermal emitter as that of Fig. 1 (tungsten, 3100K) is optimally enclosed by such a structure, the fraction of light emitted in the visible spectrum is 84%. If such a hypothetical structure had 0.98 reflectance outside of the visible spectrum, the fraction of light emitted in the visible would be 73%. This analysis suggests that, as the fraction of light emitted in the visible is increased, it becomes exceedingly difficult for a broadband thermal emitter to reach complete visible light emission. Nevertheless, the multi-layered structure of Figure 1 is already approaching performance comparable to such idealized filters given by expression (1).

An important feature of this optimized structure is that it closely follows the emission spectrum of the plain tungsten emitter for visible wavelengths. This ensures faithful reproduction of colors. Using the same approach as in [1], we calculate a color rendering index (CRI) value of 93. (Note that the structure was not explicitly optimized for CRI; in order to minimize emission beyond 720nm, the structure has a steep reflectance cutoff which affects the red part of the visible spectrum. Simply extending this boundary (to 750nm or slightly higher), could be the simplest way to improve the CRI.)

Another quantity of interest may be the luminous efficacy of this system. A black-body at 3000K(5800)K, with its spectrum truncated to 380-720nm wavelength range would have the luminous efficacy of 230(235) lum/W (equivalent to 34(34.5)%, when scaled by the maximum possible luminous efficacy for the peak wavelength of the eye's sensitivity). In comparison to these values, the structure of Figure 1 reaches luminous efficacy of **253 lum/W** (equivalent to 37% when scaled).

The details of this structure (materials & thicknesses) are listed on the following page (note: the structure was not optimized to minimize the number of layers).

References

- [1] O. Ilic, P. Bermel, G. Chen, J.D. Joannopoulos, I. Celanovic and M. Soljačić. *Nature Nanotechnology* (advanced online publication Jan. 11th 2016).

#	D [nm]	Type	#	D [nm]	Type	#	D [nm]	Type	#	D [nm]	Type	#	D [nm]	Type	#	D [nm]	Type
1	269.6	Al2O3	115	263.7	Al2O3	229	70.5	Al2O3	343	50.2	Al2O3	457	104.6	TiO2	571	171	SiO2
2	213.1	Ta2O5	116	203.6	Ta2O5	230	28.2	Ta2O5	344	50.3	Ta2O5	458	45.3	Ta2O5	572	5.6	Al2O3
3	506.2	TiO2	117	345.4	TiO2	231	246.9	TiO2	345	154.6	TiO2	459	56.9	Al2O3	573	112.9	TiO2
4	208.2	Ta2O5	118	196.7	Ta2O5	232	81.8	Ta2O5	346	52.8	Ta2O5	460	149.8	SiO2	574	1.7	Al2O3
5	266.5	Al2O3	119	244.5	Al2O3	233	83.9	Al2O3	347	72.2	Al2O3	461	24.6	Al2O3	575	187.5	SiO2
6	833.5	SiO2	120	376.8	SiO2	234	356.5	SiO2	348	218.5	SiO2	462	53.9	Ta2O5	576	10.5	Al2O3
7	265	Al2O3	121	41.6	Al2O3	235	87.7	Al2O3	349	46.9	Al2O3	463	112.4	TiO2	577	2.1	Ta2O5
8	213.5	Ta2O5	122	54	Ta2O5	236	95	Ta2O5	350	48.2	Ta2O5	464	76.2	Ta2O5	578	113.8	TiO2
9	506	TiO2	123	447	TiO2	237	150.9	TiO2	351	176.8	TiO2	465	6.7	Al2O3	579	3.1	Ta2O5
10	212.2	Ta2O5	124	52.1	Ta2O5	238	98	Ta2O5	352	47.4	Ta2O5	466	171.5	SiO2	580	16.4	Al2O3
11	269.5	Al2O3	125	78.5	Al2O3	239	100.3	Al2O3	353	61.6	Al2O3	467	58	Al2O3	581	177.2	SiO2
12	850.5	SiO2	126	464.6	SiO2	240	288.4	SiO2	354	225.6	SiO2	468	16.5	Ta2O5	582	3.2	Al2O3
13	267.6	Al2O3	127	240.7	Al2O3	241	76.8	Al2O3	355	60.7	Al2O3	469	124.9	TiO2	583	0.6	Ta2O5
14	217.3	Ta2O5	128	60.1	Ta2O5	242	51.1	Ta2O5	356	49.3	Ta2O5	470	24.9	Ta2O5	584	106.5	TiO2
15	496.6	TiO2	129	429.5	TiO2	243	226.7	TiO2	357	183.8	TiO2	471	58.2	Al2O3	585	0.2	Ta2O5
16	218.3	Ta2O5	130	63.8	Ta2O5	244	79.7	Ta2O5	358	57.2	Ta2O5	472	152	SiO2	586	3.5	Al2O3
17	269.7	Al2O3	131	230.1	Al2O3	245	128	Al2O3	359	63.9	Al2O3	473	54	Al2O3	587	178.4	SiO2
18	832.8	SiO2	132	441.5	SiO2	246	238.5	SiO2	360	189.9	SiO2	474	47	Ta2O5	588	7.1	Al2O3
19	268.6	Al2O3	133	110.8	Al2O3	247	103.8	Al2O3	361	71.2	Al2O3	475	110.5	TiO2	589	1.6	Ta2O5
20	216.2	Ta2O5	134	70.9	Ta2O5	248	74.5	Ta2O5	362	56.7	Ta2O5	476	25.1	Ta2O5	590	107	TiO2
21	503.2	TiO2	135	367.2	TiO2	249	228.9	TiO2	363	111.2	TiO2	477	78.2	Al2O3	591	1.8	Ta2O5
22	213.4	Ta2O5	136	61.4	Ta2O5	250	45.2	Ta2O5	364	51.7	Ta2O5	478	142.8	SiO2	592	24.5	Al2O3
23	268.9	Al2O3	137	97.2	Al2O3	251	80.3	Al2O3	365	87.4	Al2O3	479	99.5	Al2O3	593	168.1	SiO2
24	847.1	SiO2	138	445.9	SiO2	252	307.5	SiO2	366	208.1	SiO2	480	126.9	TiO2	594	3.1	Al2O3
25	269.6	Al2O3	139	237.9	Al2O3	253	79.3	Al2O3	367	61.6	Al2O3	481	7.8	Ta2O5	595	98.9	TiO2
26	214.2	Ta2O5	140	60.9	Ta2O5	254	55.3	Ta2O5	368	55.1	Ta2O5	482	62.3	Al2O3	596	5	Ta2O5
27	501.5	TiO2	141	396.5	TiO2	255	234.1	TiO2	369	140.1	TiO2	483	142.6	SiO2	597	22.9	Al2O3
28	217.9	Ta2O5	142	70.2	Ta2O5	256	48.2	Ta2O5	370	50	Ta2O5	484	85.3	Al2O3	598	129.1	SiO2
29	271.9	Al2O3	143	246.3	Al2O3	257	74.7	Al2O3	371	64.4	Al2O3	485	23.7	Ta2O5	599	18.8	Al2O3
30	852	SiO2	144	396	SiO2	258	331.1	SiO2	372	218.1	SiO2	486	120.3	TiO2	600	2.3	Ta2O5
31	264	Al2O3	145	52.6	Al2O3	259	81	Al2O3	373	87.6	Al2O3	487	40.6	Al2O3	601	99.6	TiO2
32	213.8	Ta2O5	146	46	Ta2O5	260	47.9	Ta2O5	374	50.8	Ta2O5	488	146.9	SiO2	602	0.9	Al2O3
33	392.5	TiO2	147	377.8	TiO2	261	210.8	TiO2	375	131.3	TiO2	489	50.5	Al2O3	603	176.4	SiO2
34	227.3	Ta2O5	148	51.9	Ta2O5	262	47.3	Ta2O5	376	61.5	Ta2O5	490	33.7	Ta2O5	604	15.7	Al2O3
35	275.1	Al2O3	149	67.1	Al2O3	263	64.9	Al2O3	377	44.7	Al2O3	491	118.9	TiO2	605	111.6	TiO2
36	647.6	SiO2	150	606	SiO2	264	337.9	SiO2	378	172.4	SiO2	492	25.2	Ta2O5	606	2	Ta2O5
37	260.4	Al2O3	151	55.8	Al2O3	265	69.6	Al2O3	379	49.1	Al2O3	493	56.3	Al2O3	607	10.2	Al2O3
38	215.1	Ta2O5	152	53.2	Ta2O5	266	68.8	Ta2O5	380	67.3	Ta2O5	494	134.3	SiO2	608	173.4	SiO2
39	506.7	TiO2	153	377.6	TiO2	267	160.2	TiO2	381	128.7	TiO2	495	49.6	Al2O3	609	3.5	Al2O3
40	217.1	Ta2O5	154	57.7	Ta2O5	268	94.8	Ta2O5	382	65.9	Ta2O5	496	25.1	Ta2O5	610	0.7	Ta2O5
41	274.7	Al2O3	155	78.1	Al2O3	269	106	Al2O3	383	59.4	Al2O3	497	108.1	TiO2	611	103.1	TiO2
42	934.7	SiO2	156	594.2	SiO2	270	270	SiO2	384	159	SiO2	498	28.1	Ta2O5	612	1.4	Al2O3
43	472.4	Al2O3	157	68	Al2O3	271	73	Al2O3	385	65.2	Al2O3	499	55.4	Al2O3	613	129.9	SiO2
44	384.7	Ta2O5	158	54	Ta2O5	272	56	Ta2O5	386	67.2	Ta2O5	500	126.8	SiO2	614	33.6	Al2O3
45	828	TiO2	159	335.9	TiO2	273	197.4	TiO2	387	124.1	TiO2	501	73.2	Al2O3	615	6	Ta2O5
46	385.7	Ta2O5	160	59.1	Ta2O5	274	60.6	Ta2O5	388	56.5	Ta2O5	502	128.2	TiO2	616	92.9	TiO2
47	479.8	Al2O3	161	72.6	Al2O3	275	80.2	Al2O3	389	81.6	Al2O3	503	51.7	Al2O3	617	172.4	SiO2
48	947.7	SiO2	162	504.8	SiO2	276	282.9	SiO2	390	194.2	SiO2	504	159	SiO2	618	21.2	Al2O3
49	264.1	Al2O3	163	93.2	Al2O3	277	88.3	Al2O3	391	82.4	Al2O3	505	33.4	Al2O3	619	100.5	TiO2
50	216.7	Ta2O5	164	68.2	Ta2O5	278	54.2	Ta2O5	392	52.2	Ta2O5	506	21.9	Ta2O5	620	1	Ta2O5
51	513.7	TiO2	165	291	TiO2	279	212.6	TiO2	393	106.1	TiO2	507	121	TiO2	621	35.5	Al2O3
52	214.5	Ta2O5	166	80.1	Ta2O5	280	50.5	Ta2O5	394	46.2	Ta2O5	508	74.2	Al2O3	622	146.2	SiO2
53	262.8	Al2O3	167	94	Al2O3	281	79.2	Al2O3	395	79.2	Al2O3	509	141.8	SiO2	623	96.5	TiO2
54	953.3	SiO2	168	447.9	SiO2	282	234.4	SiO2	396	167.8	SiO2	510	57.5	Al2O3	624	3.6	Ta2O5
55	478.8	Al2O3	169	75.9	Al2O3	283	90.2	Al2O3	397	63.3	Al2O3	511	37	Ta2O5	625	14.9	Al2O3
56	384.6	Ta2O5	170	61.5	Ta2O5	284	79.9	Ta2O5	398	44.9	Ta2O5	512	101.6	TiO2	626	137.3	SiO2
57	834.5	TiO2	171	282.5	TiO2	285	136.3	TiO2	399	132.2	TiO2	513	31.1	Ta2O5	627	95.3	TiO2

58	378.9	Ta2O5	172	74.8	Ta2O5	286	86.9	Ta2O5	400	70	Ta2O5	514	36.3	Al2O3	628	3.1	Ta2O5
59	466.7	Al2O3	173	87.6	Al2O3	287	97.1	Al2O3	401	75.2	Al2O3	515	148.7	SiO2	629	9	Al2O3
60	929.3	SiO2	174	457	SiO2	288	285.1	SiO2	402	187.7	SiO2	516	61	Al2O3	630	126.3	SiO2
61	277.8	Al2O3	175	77	Al2O3	289	71.8	Al2O3	403	71.6	Al2O3	517	117.6	TiO2	631	6.5	Al2O3
62	216.4	Ta2O5	176	46.1	Ta2O5	290	33.8	Ta2O5	404	33	Ta2O5	518	29	Ta2O5	632	1.8	Ta2O5
63	388.7	TiO2	177	246.1	TiO2	291	226.9	TiO2	405	123.3	TiO2	519	34.6	Al2O3	633	94.5	TiO2
64	217.7	Ta2O5	178	85.5	Ta2O5	292	45.9	Ta2O5	406	72.8	Ta2O5	520	165.8	SiO2	634	2.4	Ta2O5
65	265.4	Al2O3	179	101.2	Al2O3	293	86.9	Al2O3	407	46.6	Al2O3	521	46.4	Al2O3	635	6.5	Al2O3
66	666	SiO2	180	400.2	SiO2	294	246.6	SiO2	408	166.4	SiO2	522	128.1	TiO2	636	123.3	SiO2
67	270.4	Al2O3	181	93.7	Al2O3	295	84.1	Al2O3	409	27.1	Al2O3	523	49.3	Al2O3	637	7.9	Al2O3
68	211.6	Ta2O5	182	86.9	Ta2O5	296	54.1	Ta2O5	410	68.1	Ta2O5	524	156.4	SiO2	638	95.7	TiO2
69	379.8	TiO2	183	284.4	TiO2	297	206.1	TiO2	411	132.8	TiO2	525	44.1	Al2O3	639	2.9	Ta2O5
70	214.8	Ta2O5	184	87.3	Ta2O5	298	39.5	Ta2O5	412	49.6	Ta2O5	526	116.8	TiO2	640	7.9	Al2O3
71	271	Al2O3	185	89.6	Al2O3	299	60.7	Al2O3	413	64	Al2O3	527	15.1	Ta2O5	641	117.5	SiO2
72	680.8	SiO2	186	401.7	SiO2	300	294.9	SiO2	414	167.2	SiO2	528	53.7	Al2O3	642	8.5	Al2O3
73	265.2	Al2O3	187	104.6	Al2O3	301	58.3	Al2O3	415	78.1	Al2O3	529	138.2	SiO2	643	2.4	Ta2O5
74	209.8	Ta2O5	188	89	Ta2O5	302	42.6	Ta2O5	416	34.9	Ta2O5	530	48.2	Al2O3	644	94.9	TiO2
75	375.9	TiO2	189	291.4	TiO2	303	190.3	TiO2	417	113.5	TiO2	531	112.9	TiO2	645	2.5	Ta2O5
76	204.2	Ta2O5	190	81.9	Ta2O5	304	45.6	Ta2O5	418	47.5	Ta2O5	532	0.6	Ta2O5	646	9.1	Al2O3
77	245.4	Al2O3	191	96.2	Al2O3	305	61.9	Al2O3	419	59.3	Al2O3	533	18.6	Al2O3	647	114.9	SiO2
78	632.6	SiO2	192	393.2	SiO2	306	339	SiO2	420	157.3	SiO2	534	192.4	SiO2	648	7.5	Al2O3
79	247.7	Al2O3	193	76.2	Al2O3	307	60.8	Al2O3	421	51.7	Al2O3	535	19.4	Al2O3	649	2.7	Ta2O5
80	200.5	Ta2O5	194	35.7	Ta2O5	308	46.1	Ta2O5	422	68.3	Ta2O5	536	2.5	Ta2O5	650	100.5	TiO2
81	357.6	TiO2	195	256	TiO2	309	191.8	TiO2	423	120.3	TiO2	537	125.5	TiO2	651	2.5	Ta2O5
82	197	Ta2O5	196	99.5	Ta2O5	310	41.4	Ta2O5	424	37.9	Ta2O5	538	37.8	Al2O3	652	8.4	Al2O3
83	254	Al2O3	197	104.3	Al2O3	311	68.7	Al2O3	425	61	Al2O3	539	161.1	SiO2	653	91.7	SiO2
84	608.1	SiO2	198	361.8	SiO2	312	263.4	SiO2	426	160.4	SiO2	540	55.5	Al2O3	654	11.4	Al2O3
85	246.1	Al2O3	199	106.2	Al2O3	313	62.1	Al2O3	427	78.9	Al2O3	541	124.7	TiO2	655	4.1	Ta2O5
86	196.4	Ta2O5	200	82	Ta2O5	314	43.2	Ta2O5	428	49.9	Ta2O5	542	1.4	Ta2O5	656	101.6	TiO2
87	364.4	TiO2	201	247.3	TiO2	315	181.3	TiO2	429	108	TiO2	543	34	Al2O3	657	4.2	Ta2O5
88	195.9	Ta2O5	202	56.8	Ta2O5	316	47.2	Ta2O5	430	35.2	Ta2O5	544	174.1	SiO2	658	14.3	Al2O3
89	260.1	Al2O3	203	95	Al2O3	317	64.9	Al2O3	431	79.3	Al2O3	545	19.9	Al2O3	659	78.6	SiO2
90	545.8	SiO2	204	317.5	SiO2	318	273.5	SiO2	432	179.2	SiO2	546	120.8	TiO2	660	17.4	Al2O3
91	252.8	Al2O3	205	84.1	Al2O3	319	64.9	Al2O3	433	84.9	Al2O3	547	48.5	Al2O3	661	3.5	Ta2O5
92	200.5	Ta2O5	206	40.5	Ta2O5	320	46.5	Ta2O5	434	26.2	Ta2O5	548	164.9	SiO2	662	99.2	TiO2
93	230.9	TiO2	207	267.1	TiO2	321	196.7	TiO2	435	109.7	TiO2	549	24.4	Al2O3	663	1.5	Ta2O5
94	195.7	Ta2O5	208	86.9	Ta2O5	322	48.2	Ta2O5	436	31.4	Ta2O5	550	117.7	TiO2	664	6.2	Al2O3
95	254.6	Al2O3	209	93.2	Al2O3	323	64.3	Al2O3	437	81.9	Al2O3	551	2.3	Al2O3	665	115.3	SiO2
96	459.9	SiO2	210	366.8	SiO2	324	195.6	SiO2	438	157.9	SiO2	552	166.6	SiO2	666	13.1	Al2O3
97	268.8	Al2O3	211	108.3	Al2O3	325	70.9	Al2O3	439	74.6	Al2O3	553	52.1	Al2O3	667	3.7	Ta2O5
98	203.2	Ta2O5	212	100	Ta2O5	326	46.7	Ta2O5	440	40.3	Ta2O5	554	111.1	TiO2	668	88.9	TiO2
99	373.6	TiO2	213	171.8	TiO2	327	201.1	TiO2	441	116.6	TiO2	555	43.2	Al2O3	669	5.9	Ta2O5
100	187.1	Ta2O5	214	103.4	Ta2O5	328	33.2	Ta2O5	442	50.7	Ta2O5	556	166.2	SiO2	670	26.2	Al2O3
101	242.7	Al2O3	215	114.9	Al2O3	329	75.1	Al2O3	443	49.3	Al2O3	557	113.4	TiO2	671	90.1	SiO2
102	425.4	SiO2	216	325.6	SiO2	330	242	SiO2	444	145.5	SiO2	558	2	Ta2O5	672	14.5	Al2O3
103	125	Al2O3	217	101.5	Al2O3	331	49	Al2O3	445	68.2	Al2O3	559	11.8	Al2O3	673	4.2	Ta2O5
104	66.8	Ta2O5	218	64.4	Ta2O5	332	43.5	Ta2O5	446	37.9	Ta2O5	560	165.5	SiO2	674	96.5	TiO2
105	358.1	TiO2	219	229.5	TiO2	333	184.2	TiO2	447	130	TiO2	561	44.4	Al2O3	675	2.9	Ta2O5
106	69.2	Ta2O5	220	44	Ta2O5	334	26.4	Ta2O5	448	90.7	Al2O3	562	1.9	Ta2O5	676	6.9	Al2O3
107	113.2	Al2O3	221	76.7	Al2O3	335	64.8	Al2O3	449	171.6	SiO2	563	117.5	TiO2	677	113.1	SiO2
108	421.5	SiO2	222	287.1	SiO2	336	270.5	SiO2	450	97.6	Al2O3	564	1	Ta2O5	678	11.8	Al2O3
109	239.4	Al2O3	223	108.6	Al2O3	337	55.9	Al2O3	451	118.5	TiO2	565	27.8	Al2O3	679	54.9	Ta2O5
110	195.1	Ta2O5	224	83	Ta2O5	338	32.6	Ta2O5	452	16.8	Ta2O5	566	166.5	SiO2	680	46.6	TiO2
111	360.2	TiO2	225	232.6	TiO2	339	185.9	TiO2	453	74.7	Al2O3	567	29.9	Al2O3	681	88.3	SiO2
112	199.1	Ta2O5	226	69.2	Ta2O5	340	36.7	Ta2O5	454	179.3	SiO2	568	1.1	Ta2O5			
113	257.5	Al2O3	227	107.2	Al2O3	341	64.2	Al2O3	455	54.9	Al2O3	569	116.1	TiO2			
114	545.4	SiO2	228	384.9	SiO2	342	258.8	SiO2	456	41.3	Ta2O5	570	36.2	Al2O3			